



Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensifApplication à la couverture hivernale des sols en Bretagne

Samuel Corgne

► To cite this version:

Samuel Corgne. Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensifApplication à la couverture hivernale des sols en Bretagne. Géographie. Université Rennes 2, 2004. Français.
NNT : . halshs-00005478

HAL Id: halshs-00005478

<https://theses.hal.science/halshs-00005478>

Submitted on 10 Nov 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE DE RENNES 2- HAUTE-BRETAGNE

Discipline : GEOGRAPHIE

Présentée par

Samuel CORGNE

COSTEL UMR CNRS 6554 LETG
En Cotutelle avec l'ENST-Bretagne

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L' UNIVERSITE DE RENNES 2 – HAUTE-BRETAGNE

**Modélisation prédictive de l'occupation des sols
en contexte agricole intensif : application à la
couverture hivernale des sols en Bretagne**

Membres du jury :

Jean-Pierre MARCHAND, Professeur - Université de Rennes 2 (*Président de jury*)
Laurence HUBERT-MOY, Maître de conférence, HDR-Univ. de Rennes 2 (*Directrice*)
Daniel DELAHAYE, Professeur - Université de Caen (*Rapporteur*)
Pierre DUMOLARD, Professeur - Université de Grenoble 1 (*Rapporteur*)
Grégoire MERCIER, Maître de Conférence - ENST-Bretagne (*Examineur*)
Jean DEZERT, Enseignant Chercheur - ONERA (*Examineur*)

Soutenue le 10 Décembre 2004

THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE DE RENNES 2- HAUTE-BRETAGNE

Discipline : GEOGRAPHIE

Présentée par

Samuel CORGNE

COSTEL UMR CNRS 6554 LETG
En Cotutelle avec l'ENST-Bretagne

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L' UNIVERSITE DE RENNES 2 – HAUTE-BRETAGNE

**Modélisation prédictive de l'occupation des sols
en contexte agricole intensif : Application à la
couverture hivernale des sols en Bretagne**

Membres du jury :

Jean-Pierre MARCHAND, Professeur - Université de Rennes 2 (*Président de jury*)
Laurence HUBERT-MOY, Maître de conférence, HDR-Univ. de Rennes 2 (*Directrice*)
Daniel DELAHAYE, Professeur - Université de Caen (*Rapporteur*)
Pierre DUMOLARD, Professeur - Université de Grenoble 1 (*Rapporteur*)
Grégoire MERCIER, Maître de Conférence - ENST-Bretagne (*Examineur*)
Jean DEZERT, Enseignant Chercheur - ONERA (*Examineur*)

Soutenue le 10 Décembre 2004

Remerciements

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Laurence Hubert-Moy, Professeur de Géographie à l'Université de Rennes II pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer cette thèse au sein du laboratoire COSTEL. Je lui suis par ailleurs, très reconnaissant du suivi régulier et formateur reçu durant ces trois années de doctorat me permettant ainsi d'appréhender les exigences de la recherche en Géographie.

J'exprime également ma vive reconnaissance à Jean-Pierre Marchand, Professeur de Géographie à l'Université de Rennes II, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette thèse.

Je tiens à remercier sincèrement Grégoire Mercier, Maître de Conférence à l'Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications de Bretagne (ENSTB) pour sa grande disponibilité et pour l'aide spécifique apportée à ce travail. Mes remerciements vont également à Mr Bassel Solaiman, Directeur du laboratoire ITI (Image et Traitement de l'Information) de l'ENSTB pour m'avoir permis de me former à la fusion de données en général.

Mes remerciements s'adressent aussi à Jean Dezert, Enseignant-Chercheur à l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA), Unité Traitement d'Images, pour le temps consacré à m'expliquer les fondements et les potentialités applicatives de sa nouvelle théorie. Mes remerciements vont également au co-auteur de la « DSMT », Florentin Smarandache, professeur de Mathématique à l'Université de New Mexico (Gallup Campus).

Mes remerciements s'adressent également à Mr Daniel Delahaye, Professeur de Géographie à l'Université de Basse Normandie de Caen et à Mr Pierre Dumolard, Professeur à l'Université de Géographie Alpine de Grenoble et Directeur du laboratoire SEIGAD (Systèmes Environnementaux, Information Géographique et Aide à la Décision) pour avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse.

Mes remerciements, pour tous les membres de l'équipe COSTEL dirigée par Monsieur Vincent Dubreuil avec une pensée toute spéciale pour tous les thésards (anciens et actuels) du laboratoire (Vincent, Thomas, Rémi, Fernand, Morgane, Mabiane, David, Medhi, Rahim...).

Je tiens à remercier également tous les acteurs des collectivités territoriales en Bretagne qui m'ont toujours bien accueilli et favorablement aidé pour ce travail, en particulier Bénédicte Lebreton (Communauté d'Agglo. de Lannion), T. Mounier et S. Harraut du Syndicat du Scorff.

Merci également à ma mère pour m'avoir offert la possibilité de poursuivre mes études et pour son soutien dans les moments de doute bien connus des thésards.

Enfin, dans tout cursus universitaire, il y a toujours plusieurs professeurs qui, pour de multiples raisons, donnent et provoquent l'envie d'apprendre et de connaître, à cet égard, je salue ici sincèrement Robert Bariou et Marc Robin.

*"La connaissance est une navigation dans un océan
d'incertitudes à travers des archipels de certitudes".*

Edgar Morin

Résumé

La couverture hivernale des sols a un impact avéré sur la qualité de l'eau, en influant sur le transfert des flux de polluants d'origine agricole au sein de bassins versants. Sa prédiction, si elle peut constituer une aide à la programmation d'actions dans le cadre de programmes de restauration de la qualité de l'eau, pose cependant un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique. L'objectif de ce travail est de développer une méthode reproductible qui permette d'effectuer une prédiction à court terme de la couverture hivernale des sols. Une approche approximative reposant sur un modèle expert utilisant la règle des évidences de Dempster-Shafer a été retenue, car elle permet de prendre en compte l'imprécision et les lacunes de connaissances liées à cette problématique et aux données disponibles, et d'associer un degré de confiance aux résultats produits. Des prédictions de la couverture hivernale des sols sont d'abord effectuées sur un site expérimental localisé en Bretagne selon les deux hypothèses « Sols couverts » et « sols nus à peu couverts ». Après avoir déterminé les dynamiques spatio-temporelles des changements passés, notamment à partir d'une série multitemporelle d'images de télédétection, et avoir défini les facteurs motivant les changements passés et à venir, la fusion des sources d'informations qui représentent ces facteurs est réalisée avec la règle de Dempster-Shafer. Les résultats sont mitigés : Les prédictions sont cohérentes à l'échelle du bassin versant mais l'affectation spatiale des prédictions à l'échelle parcellaire, qui est bonne pour la classe « Sols couverts » reste problématique pour la classe « Sols nus à peu couverts » en raison du niveau de conflit élevé entre les sources d'information pour cette hypothèse. L'utilisation de la théorie récente de Dezert-Smarandache, qui autorise la prise en compte d'informations paradoxales, permet d'améliorer les scores de prédictions pour la classe « Sols nus à peu couverts ». Une évaluation de la reproductibilité de l'approche prédictive développée est alors effectuée à travers l'application du modèle sur un bassin versant plus étendu et où les données sont moins nombreuses. Si la classe « Sols couverts » reste bien évaluée avec les deux règles de fusion, l'affectation spatiale de la classe « Sols nus à peu couverts » est en revanche toujours affectée d'un faible taux de prédiction correcte, illustrant la nécessité de l'intégration de nouvelles sources d'information dans le modèle pour cette hypothèse aux fortes variabilités spatiotemporelles.

Mots-clés : Environnement, Modélisation approximative, Télédétection, Analyse Spatiale, Bassin versant, Incertitude, Fusion de données, Théorie de Dempster-Shafer, Théorie de Dezert-Smarandache.

Abstract

In intensive agricultural regions, winter vegetation covering is a key indicator of water transfer processes. Its prediction can help local decision making for restoring water quality. Though, spatial prediction modelling of winter land cover is complex and thus it appears necessary to introduce uncertainty in the modelling process, especially as high spatial and temporal variability are encountered. The objective of this work is to develop a reproducible method to predict the land cover distribution for the following winter season for the two hypotheses "Bare soils" and "Covered soils". The selected modelling approach is based on an expert model using the Dempster-Shafer rule, because it considers both uncertainty and imprecision both in the modelling process and in the results, as confidence levels are associated with the predictions. The model has been applied on an experimental watershed located in Brittany. After having assessed the spatial and temporal dynamics of winter coverage from a multitemporal series of remote sensing images, and identified the driving factors of these changes, sources of information representing these factors are fused with the Dempster's rule. Results are ambivalent according to the studied hypothesis. The prediction scores are good at the watershed scale but present limits for allocating the land class at a field scale, especially for the "Bare soils" class, because the level of conflict between sources of information is high. The Dezert-Smarandache theory, that allows to introduce paradoxical information in the modelling process, is then applied and increases the prediction scores for the "Bare soils" class. The reproductibility of the modeling approach is then evaluated in applying the model on another study site, wider and less documented than the previous one. The "Bare soils" class remains well evaluated with both fusion rules, but the spatial allocation of the land class at a field scale is still not well managed, that indicates the need to integrate new sources of information in the model to better predict the future land allocation.

Key-words: Environment, Remote Sensing, Approximate Modelling, Spatial Analysis, Watershed, Uncertainty, Data Fusion, Dempster-Shafer Theory, Dezert-Smarandache Theory.

Liste des sigles et acronymes

- **5S** : Simulation of the Sensor Signal in the Solar Spectrum (5S Model)
- **BEP** : Bretagne Eau Pure
- **CAREN** : Centre Armoricaire de Recherche en Environnement
- **CEMAGREF** : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
- **CERESA** : Centre d'Etudes et de Recherches sur l'Environnement et les Sols pour l'Aménagement
- **CIPAN** : Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates
- **CORPEN** : Comité d'ORientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement
- **COSTEL** : Climat, Occupation du Sol par TELédétection
- **CTE** : Contrats Territoriaux d'Exploitation
- **DIREN** : Directions Régionales de l'ENvironnement
- **DSmT** : Dezert-Smarandache Theory
- **DST** : Dempster-Shafer Theory
- **ENSAR** : Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes
- **ENSTB** : Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne
- **EARL** : Entreprise Agricole à Responsabilité Limitée
- **GAEC** : Groupement Agricole d'Exploitation en Commun
- **IM** : Information Mutuelle
- **INCA** : Integrated Nitrogen in Catchments
- **INRA** : Institut National de la Recherche Agronomique
- **IRS-LISS** : Indian Remote Sensing Linear Imaging and Self Scanning Sensor
- **Landsat TM** : Landsat Thematic Mapper
- **LUCC** : Land Use and Land Cover Change
- **MARS** : Monitoring of Agriculture with Remote Sensing
- **NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index
- **NOAA AVHRR** : National Oceanic and Atmospheric Administration Advanced Very High Resolution Radiometer
- **NRC** : National Research Council
- **OMC** : Organisation mondiale du commerce
- **ONERA** : Office National d'Etudes et de Recherche Aérospatiales
- **PAC** : Politique Agricole Commune
- **PIR** : Proche InfraRouge
- **PMPOA** : Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole
- **PNTS** : Programme National de Télédétection Spatiale
- **PRIR** : Programme de recherche d'intérêt régional
- **RGA** : Recensement Général Agricole
- **RMS** : Root Mean Square (Error)
- **SAU** : Surface Agricole Utile
- **SFP** : Surface Fourragère Principale
- **SIG** : Système d'Information Géographique
- **SPOT HRV** : SPOT Haute Résolution Visible
- **SPOT HRVIR** : SPOT Haute Résolution Visible InfraRouge
- **TSAVI** : Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
- **ZES** : Zones d'Excédent Structurel

TABLE DES MATIERES

Liste des sigles et acronymes	2
Introduction.....	7
Chapitre 1	11
Suivi et prédiction de l'évolution de l'occupation du sol en Bretagne	11
1.1. Problématique et enjeux du suivi de l'évolution de l'occupation du sol	12
1.1.1. Cadre général.....	13
1.1.1.1. <i>Occupation et utilisation du sol : distinctions sémantiques</i>	13
1.1.1.2. <i>Le suivi de l'occupation et de l'utilisation du sol</i>	15
1.1.2. Le suivi de l'évolution de l'occupation du sol en Bretagne : un enjeu environnemental majeur	20
1.1.2.1. <i>La Bretagne, première région agricole française</i>	20
1.1.2.2. <i>Les pollutions d'origine agricole et leurs impacts sur l'environnement</i>	24
1.2. Le cas particulier de la couverture hivernale des sols	31
1.2.2. Problématiques liées à la couverture hivernale des sols en Bretagne	32
1.2.2.1. <i>Un thème sensible</i>	32
1.2.2.2. <i>L'implantation d'une interculture comme moyen de lutte contre les pollutions d'origine agricole</i>	34
1.2.2.3. <i>Les échelles d'analyse du couvert hivernal des sols</i>	36
1.2.3. Une classe d'occupation du sol aux limites floues	39
1.2.3.1. <i>La couverture hivernale des sols : un état de transition de l'utilisation du sol</i>	39
1.2.3.2. <i>La couverture hivernale des sols : un caractère incertain et imprécis</i>	41
1.3. Modélisation prédictive de l'occupation des sols.....	45
1.3.1. Rappels sur l'approche conceptuelle de la modélisation	45
1.3.1.1. <i>La modélisation en géographie</i>	45
1.3.1.2. <i>Les différentes approches modélisatrices</i>	49
1.3.2. Les modèles de simulation de l'évolution de l'occupation du sol	52
1.3.2.1. <i>Les modèles reposant sur une approche « dure »</i>	53
1.3.2.2. <i>Les modèles reposant sur une approche « approximative »</i>	55
1.3.3. Simulation de l'évolution de la couverture hivernale des sols par une approche approximative	57

1.3.3.1. Prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision dans le processus de modélisation.....	58
1.3.3.2. Le choix d'un modèle pour simuler la couverture hivernale des sols en contexte agricole intensif	60

Chapitre 2..... 61

Modélisation prédictive à partir de la théorie des évidences..... 61

2.1. La théorie des évidences de Dempster-Shafer	62
2.1.1. Notions fondamentales.....	63
2.1.1.1. Une extension de la théorie de Bayes.....	63
2.1.1.2. Le cadre de discernement.....	64
2.1.1.3. Les fonctions de masses élémentaires	65
2.1.1.4. La fonction de croyance	66
2.1.1.5. La fonction de plausibilité	66
2.1.2. La règle de Fusion de DST	67
2.1.2.1. Principe.....	67
2.1.2.2. Quelques commentaires	68
2.1.3. La prise de décision	69
2.1.4. Applications de la DST	72
2.2. Présentation du site d'étude et des données.....	73
2.2.1. Un contexte environnemental marqué par des marées vertes.....	73
2.2.2. Une production agricole orientée vers l'élevage bovin.....	78
2.2.3. Les données.....	82
2.2.3.1. La base de données.....	82
2.2.3.2. Les prétraitements des données image	83
2.3. Application de la théorie des évidences pour la modélisation de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar	86
2.3.1. Détermination de la couverture hivernale des sols	88
2.3.1.1. Taux de couverture des sols	89
2.3.1.2. L'identification des intercultures	94
2.3.2. Les changements de la couverture hivernale des sols	96
2.3.2.1. Analyse à partir des vecteurs de changement.....	97
2.3.2.2. Analyse par les rotations culturales.....	100
2.3.3. Les facteurs de changement.....	103
2.3.3.1. Les échelles des changements.....	103
2.3.3.2. Identification des facteurs.....	106
2.3.3.3. Hiérarchisation des facteurs.....	109
2.3.4. Prédiction de la couverture hivernale des sols appliquée au système d'exploitation de type « bovin mixte »	116

2.3.4.1. Affectation des jeux de masse pour chaque hypothèse, fusion des données, et prise de décision.....	116
2.3.4.2. Résultats.....	117

Chapitre 3 128

L'approche paradoxale dans le processus de modélisation prédictive des changements de la couverture hivernale des sols 128

3.1. La gestion du conflit en fusion de données.....	129
3.1.1. La gestion du conflit entre les sources avec Dempster-Shafer	129
3.1.2. Les méthodes de gestion du conflit.....	131
3.1.3. La gestion du conflit avec l'affaiblissement des sources appliquée au site d'étude... 133	
3.1.3.1. L'identification des sources d'information conflictuelles.....	133
3.1.3.2. Application au site d'étude	138
3.2. La gestion des sources d'information avec la théorie de Dezert-Smarandache	139
3.2.1. Le principe général	140
3.2.1.1. Le cadre de discernement généralisé	140
3.2.1.2. Jeu de masse généralisé	142
3.2.1.3. Les fonctions de croyance et de plausibilité généralisées	142
3.2.2. Les spécificités de la DSMT	143
3.2.2.1. La transformation pignistique généralisée	143
3.2.2.2. La règle de fusion de Dezert-Smarandache	143
3.2.2.3. Quelques exemples de fusion de données avec la DSMT	144
3.3. Application de la DSMT à la prédiction de la couverture hivernale des sols	146
3.3.1. Le cadre de travail.....	147
3.3.2. Application et optimisation de la DSMT sur le bassin versant du Yar	149
3.3.2.1. Utilisation de la théorie de la DSMT pour la prédiction des changements de la couverture hivernale des sols.....	149
3.3.2.2. Optimisation de la théorie de la DSMT pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts »	151

Chapitre 4 159

Simulations prédictives de l'occupation hivernale des sols au-delà du site expérimental 159

4.1. Présentation du site d'étude et des données.....	161
4.1.1. La qualité de l'eau sur le bassin versant du Scorff.....	161
4.1.2. Un bassin versant à vocation agricole.....	164
4.1.3. Les données utilisées	168
4.2. Les changements de la couverture hivernale des sols	169

4.2.1. Analyse des changements de l'occupation et de l'utilisation des sols par télédétection	170
4.2.1.1. La détection de la couverture hivernale des sols	170
4.2.1.2. La détection des cultures annuelles	174
4.2.1.3. Le suivi de la couverture hivernale des sols pour les hivers 2000/01-2001/02	176
4.2.1.4. Le suivi des cultures annuelles pour les étés 2001 et 2002	179
4.2.1.5. Les successions des modes d'occupation des sols	179
4.2.2. Les facteurs de changements	181
4.2.2.1. Choix et validation des facteurs de changement	181
4.2.2.2. Hiérarchisation des facteurs de changement	186
4.3. Prédiction de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Scorff.....	187
4.3.1. La détermination des jeux de masse	187
4.3.2. Les résultats obtenus avec la théorie de Dempster-Shafer	192
4.3.2.1. Les prédictions basées sur les probabilités pignistiques	192
4.3.2.2. La validation des prédictions à l'échelle parcellaire	196
4.3.3. Les résultats obtenus avec la théorie de Dezert-Smarandache	198
4.3.3.1. Les résultats issus d'une affectation identique des jeux de masse	198
4.3.3.2. Les résultats issus du transfert des masses de l'incertitude sur le paradoxe	199
Conclusion générale.....	203
Liste des figures	207
Liste des tableaux	210
Références	212

Introduction

Les changements d'occupation et d'utilisation des terres sont un facteur clé du développement durable. Ils modifient de façon significative les interactions terre-atmosphère, influencent la biodiversité, les cycles biogéochimiques, entraînant la dégradation de la qualité de l'eau par exemple. Ils jouent également un rôle dans l'évolution des climats, comme le montrent les études évaluant l'impact des mutations d'usage des terres sur les modèles de circulation générale. Les effets des changements d'utilisation des sols sur les processus, les systèmes écologiques et sur les interactions terre-atmosphère sont désormais pris en compte dans les recherches menées sur le « Changement Global », notamment dans le cadre du programme IGBP (International Geosphere-Biosphere Program). Les modèles de circulation atmosphérique générale, comme les modèles qui décrivent les échanges d'eau, d'énergie et de carbone entre la biosphère et l'atmosphère, requièrent des informations précises et spatialisées sur les changements de l'utilisation des sols (Sellers et al, 1997), ce qui nécessite de développer des méthodes permettant de cartographier les changements d'occupation des sols à l'échelle régionale (Programme LUCC, Land Use/Cover Changes, émanation des programmes IGBP/HDP). L'approche régionale des dynamiques d'occupation du sol suppose la compréhension de processus des changements d'utilisation des sols, de leurs variations spatio-temporelles, et passe par la définition des facteurs humains et des facteurs du milieu qui produisent localement ces changements (Land Use/Cover Change Project - référence LUCC Science Plan). Ces derniers dépendent très fortement des modes d'utilisation des terres et des pratiques agricoles qui sont liés au contexte social, économique, politique et au milieu physique des espaces considérés.

Dans des régions d'agriculture intensive telle que la Bretagne, la connaissance de l'évolution de l'utilisation et de l'occupation des sols représente un enjeu important. Des changements de systèmes culturels, des modifications des structures paysagères et des pratiques agricoles ont entraîné depuis quelques décennies des problèmes environnementaux, en particulier une dégradation importante des ressources en eau. La mise en place depuis le début des années 90 de programmes de restauration de la qualité de l'eau a enclenché des modes d'usage des sols et des pratiques agricoles dont certains peuvent se traduire spatialement. Dans ce contexte, la connaissance des variations spatio-temporelles de l'occupation et de l'utilisation des sols constitue un élément-clé dans une démarche de restauration de la qualité de l'eau. En particulier, les successions d'états de couverts végétaux sur les parcelles en hiver influent sur les transferts de flux polluants, jouant comme un

accélérateur lorsque les parcelles sont laissées nues après des cultures telles que le maïs ou les céréales, ou comme un frein lorsqu'elles sont couvertes par des intercultures. Ainsi, l'évolution de la localisation de la couverture végétale en hiver au sein des bassins versants a un impact sur la qualité de l'eau en faisant notamment varier les taux de nitrates et de pesticides, la proportion de surfaces agricoles laissées nues constituant un des indicateurs retenus pour l'étude de l'évolution des systèmes de production agricole vis-à-vis de l'environnement. La définition de trajectoires des changements de la couverture hivernale des sols présente ainsi un intérêt dans le cadre des programmes de restauration de la qualité de l'eau, tant à des fins de validation des actions entreprises pour les changements passés observés, qu'à des fins de programmation d'actions pour les changements à venir à travers l'établissement de scénarios prédictifs.

Cependant, la couverture hivernale est une classe d'occupation des sols mal connue et aux contours mal définis : période de transition entre deux cultures principales, ses limites temporelles et spatiales sont floues, variant sensiblement dans l'espace et dans le temps pour de multiples raisons, d'origine anthropiques et climatiques. Son identification et *a fortiori* sa prédiction impliquent le développement de méthodes appropriées qui devront prendre en compte ces caractéristiques.

Le suivi du changement de l'occupation des sols est effectué de plus en plus souvent à partir de données de télédétection. Des images de type NOAA AVHRR ou SPOT VEGETATION, d'une précision kilométrique, et plus récemment des images de moyenne résolution de type MODIS, dont la résolution spatiale peut atteindre 250 mètres, sont utilisées afin de réaliser des cartographies à l'échelle régionale (Dubreuil, 1997 ; Champeaux *et al*, 2000 ; Dubreuil *et al.*, 2004). Elles permettent au mieux de déterminer des îlots parcellaires sans couvert végétal, dont les dynamiques spatio-temporelles doivent être validées par des études effectuées à une échelle plus fine : les données à haute résolution de type Landsat TM, SPOT ou radar, d'une précision décamétrique, permettent ainsi de réaliser des cartographies de l'occupation des sols à l'échelle de la parcelle, l'analyse des changements étant produite à l'échelle du bassin versant (Hubert-Moy *et al*, 2001 ; Launay, 1997 ; DeGrandi *et al*, 2000). A cette échelle plus locale, correspondant à des bassins versants dont la superficie varie en général d'une dizaine de km² à plusieurs centaines de km², les images permettent de réaliser, à l'aide de données d'origine diverses (socio-économiques, fonctionnement physique du milieu...), des analyses multitemporelles des changements observés, à partir desquelles des scénarii prédictifs peuvent être construits.

Au-delà de la reconstitution et de l'analyse de l'évolution des changements passés, la prédiction de changements nécessite une modélisation correcte des trajectoires de changement

sur les bassins versants étudiés. Ce travail de modélisation pose un certain nombre de problèmes méthodologiques, parmi lesquels la détermination des facteurs qui motivent ces changements, le choix des variables permettant de décrire les changements passés observés et les changements à venir, la prise en compte d'informations incomplètes et imprécises, etc. Ces questions méthodologiques doivent être considérées afin de produire des méthodes valides et extrapolables de modélisation prédictives d'utilisation et d'occupation du sol. Le cas échéant, les résultats obtenus à l'échelle des bassins versants étudiés, s'ils sont représentatifs de la diversité des modes de production agricole de la région, peuvent également servir de point de départ dans une démarche ascendante, à une extrapolation à l'échelle régionale

L'objectif principal de ce travail est de développer une méthode reproductible qui permette de produire une prédiction à court terme de la couverture hivernale des sols, en prenant en compte l'imprécision et les lacunes de connaissances liées à cette problématique, des données disponibles, et en associant un degré de confiance aux résultats produits. La réalisation de cet objectif nécessite notamment la détermination du couvert végétal, son suivi, et la définition des facteurs qui motivent les changements passés et à venir.

En conséquence, la définition et la mise en œuvre d'une méthode de prédiction du devenir de la couverture hivernale des sols sont structurées dans ce travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente la problématique générale et les divers enjeux du suivi et de la prédiction de l'occupation et de l'utilisation des sols, d'abord d'un point de vue général puis à l'échelle de la Bretagne. Le cas particulier de la couverture hivernale des sols, dont la connaissance représente un enjeu environnemental fort, est ensuite analysé en insistant sur son caractère incertain et imprécis, qui oriente les méthodes utilisées pour la déterminer, effectuer son suivi et la prédire. Une analyse des méthodes permettant d'effectuer une modélisation prédictive des modes d'occupation et d'utilisation des sols est donc réalisée afin de retenir une approche et d'utiliser un modèle adapté au cas particulier de la couverture hivernale des sols.

Le choix d'une approche approximative ayant été effectué, le deuxième chapitre met en pratique le modèle prédictif retenu, élaboré à partir de la théorie des évidences de Dempster-Shafer, afin de produire une prédiction à court terme, pour l'hiver suivant, de la couverture hivernale des sols. Cette théorie, correspondant à une extension de la règle de Bayes, est précisément exposée dans un premier point. Une présentation géographique du bassin versant expérimental sélectionné est ensuite réalisée et l'ensemble des données utilisées est analysé. Enfin, une application du modèle de Dempster-Shafer est effectuée sur le

site d'étude, en détaillant précisément les étapes de la mise en œuvre du processus de modélisation, de la détection des changements passés à l'évaluation et l'analyse des résultats, en passant par l'identification des facteurs qui motivent les changements passés et à venir.

Le troisième chapitre tente de pallier les insuffisances de la règle de fusion de Dempster-Shafer qui se présentent lorsque le niveau de conflit entre les sources d'informations utilisées dans le modèle devient important. Plusieurs méthodes de réduction du conflit sont présentées et appliquées au bassin versant étudié. Face à l'absence d'améliorations significatives des résultats, une nouvelle théorie de fusion de données, permettant de gérer l'aspect contradictoire entre les sources d'information, appelée théorie de Dezert-Smarandache ou théorie du raisonnement plausible et paradoxal, est présentée puis appliquée au site expérimental.

Le quatrième chapitre évalue la reproductibilité de l'approche définie sur le site expérimental sur un bassin versant plus étendu, où les dynamiques de changements hivernaux sont moins bien identifiées et pour lequel la base de données disponible est beaucoup moins conséquente. Les enjeux du suivi de ce site d'étude, inscrit également dans un contexte fortement agricole, font l'objet de la première partie. Puis les différentes phases de la modélisation sont appliquées, les données étant fusionnées à travers les deux règles de combinaison de Dempster-Shafer et de Dezert-Smarandache. L'analyse comparative des résultats produits est alors effectuée.

Ces recherches s'inscrivent dans le cadre du programme européen INCA (Integrated in Nitrogen Catchments Areas, UE 5th Framework Program), des programmes nationaux du PNTS (Programme National de télédétection Spatiale 2001-2003, programme « Changements d'utilisation du sol en région agricole intensive : suivi et modélisation de l'échelle globale à l'échelle locale ») et du PEVS (Programme Environnement Vies et Sociétés du CNRS, « Zone Atelier Bretagne Continentale). Ce travail de thèse est par ailleurs financé par le Conseil Régional de Bretagne à travers un PRIR (Programme de Recherche d'Intérêt Régional).

Elles ont bénéficié d'une collaboration avec plusieurs partenaires représentant des collectivités locales et territoriales : Conseil Général des Côtes d'Armor, Communauté de Communes de Lannion, Syndicat de Bassin Versant du Scorff, Chambres d'Agriculture des Côtes d'Armor et du Morbihan.

Chapitre 1

Suivi et prédiction de l'évolution de l'occupation du
sol en Bretagne

Le suivi de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol fait l'objet, depuis l'essor de la télédétection à partir des années 1980, de nombreuses recherches théoriques et applicatives. Les premiers capteurs d'observation de la terre, dont la résolution spatiale était limitée (80 mètres pour Landsat MSS, 1,1 Km pour NOAA AVHRR) ont permis au mieux d'étudier l'évolution de petites régions agricoles dans des paysages agraires de type bocager (Hubert, 1989 ; Allain, 2000 ; Dubreuil, 1997). La résolution des capteurs s'étant améliorée à partir du milieu des années 80, l'échelle d'analyse s'est affinée et des cartes d'occupation du sol à l'échelle parcellaire sont désormais réalisées grâce à des capteurs à haute et très haute résolution spatiale de type SPOT 5 (10 mètres en multispectral) ou Landsat TM+ (15 mètres en multispectral). Associé à ces importants développements technologiques, l'essor des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) a permis la création de bases de données d'occupation du sol spatialisées offrant la possibilité d'intégrer des données d'occupation et d'utilisation du sol dérivées des images de télédétection dans des modèles de suivi et plus récemment de prédiction de l'usage des terres. Ces derniers, en plein développement depuis une dizaine d'années sont souvent complexes à mettre en œuvre, car ils nécessitent d'une part la connaissance et la compréhension des facteurs qui motivent les changements observés, et d'autre part l'élaboration de modèles valides et reproductibles. En outre, ils nécessitent généralement la collaboration de nombreuses disciplines scientifiques, ce qui requiert un effort de compréhension afin de mettre en place une interface de dialogue indispensable.

Dans ce premier chapitre, nous verrons ainsi successivement le contexte et les enjeux liés au suivi de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols d'un point de vue général, puis en Bretagne. Le cas particulier du suivi de la couverture hivernale des sols, qui présente en Bretagne un intérêt important d'un point de vue environnemental, fera l'objet de la seconde partie. Enfin une troisième partie présentera les principaux modèles utilisés pour simuler l'évolution de l'occupation et d'utilisation du sol afin de déterminer le modèle le plus adapté à la production de prédictions de la couverture hivernale des sols.

1.1. Problématique et enjeux du suivi de l'évolution de l'occupation du sol

L'inventaire et le suivi de l'occupation du sol à l'échelle mondiale a pris un essor décisif avec le développement de l'imagerie satellitaire à partir des années 1980. Depuis lors, l'analyse de l'évolution de l'occupation du sol constitue un axe de recherche privilégié pour de nombreuses disciplines. Des nombreuses études effectuées sur les changements d'occupation du sol et leur relation avec la biosphère, il apparaît en effet qu'ils constituent un

indicateur significatif voir majeur dans l'étude des changements environnementaux à l'échelle globale (Mather et Sdasyuk, 1991). La connaissance des causes et des conséquences des dynamiques d'occupation du sol à différentes échelles constitue désormais un enjeu scientifique important et motive le développement de collaborations interdisciplinaires à une échelle internationale.

Après avoir défini précisément les termes « occupation » et « utilisation » du sol, une présentation générale des enjeux scientifiques qui relèvent de leur détermination et de leur suivi seront exposés. A partir de cette présentation générale, une analyse de cette problématique sur le territoire breton, où l'usage des terres et leur évolution ont un impact fort sur l'environnement, sera effectuée.

1.1.1. Cadre général

Bien saisir les problématiques et les enjeux de l'évolution des modes d'occupation et d'utilisation des sols requièrent quelques précisions sémantiques, les confusions dans ce domaine étant nombreuses et conduisant à des erreurs d'interprétation. Ainsi, sont successivement abordées dans cette partie les notions d'occupation et d'utilisation des sols, puis leur suivi.

1.1.1.1. Occupation et utilisation du sol : distinctions sémantiques

Les termes d'utilisation et d'occupation du sol sont, avec le développement de la télédétection et les SIG (Systèmes d'Information Géographiques) régulièrement utilisés dans les études de géographie. Bien que les termes occupation et utilisation du sol soient intrinsèquement liés, leur sémantique est sensiblement différente ce qui implique de les définir précisément. Souvent perçus comme plus ou moins semblables, des divergences d'interprétation de ces termes peuvent rendre parfois complexe l'interprétation de certains résultats relatifs à l'évolution de la couverture végétale dérivés par exemple de données de télédétection ou de données produites par des modèles de type prédictif.

D'une façon générale, l'occupation du sol fait référence aux propriétés physiques de la surface terrestre alors que l'utilisation du sol fait appel aux fonctions économiques et sociales de celle-ci (Mather, 1986 ; Turner *et al.*, 1993 ; NRC, 2000).

Plus précisément, trois différences sémantiques principales peuvent être identifiées entre les termes « utilisation » et « occupation » du sol (Brown et Duh, 2004) :

- La première concerne les définitions des classes de ces deux termes. L'occupation du sol peut être définie comme une observation physique à un instant « t » de la surface terrestre, incluant la végétation (naturelle ou artificielle) et les constructions humaines. L'utilisation du sol, elle, implique de connaître la manière dont sont agencés les attributs biophysiques du sol et le but poursuivi par cette gestion du territoire. L'utilisation du sol fait ainsi référence au comportement humain et plus spécifiquement aux contraintes économiques qui régissent l'exploitation et la gestion d'un territoire.

- La seconde différence tient à l'expression géométrique entre les deux termes (Brown et Duh, 2004). L'occupation du sol fait ainsi référence à un état biophysique d'un endroit précis ou à un espace homogène du paysage (par exemple, une parcelle agricole). En revanche, l'utilisation du sol fait référence à la fonction économique d'une unité spatiale en définissant par exemple le nom du propriétaire de la parcelle.

- La dernière différence repose sur les règles d'affectation des attributs pour chaque unité spatiale (Bishr *et al*, 1999). A ce niveau, de nombreuses confusions apparaissent car les termes d'utilisation et d'occupation du sol ne sont pas toujours bien définis au préalable. La définition des classes concernant l'occupation du sol est basée sur l'état du couvert végétal à un instant précis sur une portion d'un espace géographique. On retrouvera par exemple comme classes d'occupation du sol caractérisant un territoire, les classes « arbres », « bâti », « eau »,... Concernant les classes attribuées à l'utilisation du sol, celles-ci doivent fournir une information précise sur l'activité menée sur un espace géographique. Ainsi, les attributs appropriés pour définir l'utilisation du sol d'une portion d'un territoire rural seraient par exemple « forêt », « bâti résidentiel », « canal »...

Les termes d'occupation et d'utilisation du sol bien que similaires ont donc une sémantique propre induisant des méthodes d'identification différentes. Les classes d'occupation du sol sont ainsi généralement établies à partir de données de télédétection alors que les classes d'utilisation du sol requièrent des données de type socioéconomique ou cadastral (Tableau 1). L'exploitation des données d'occupation du sol et d'utilisation du sol répond donc à des objectifs différents :

-les données relatives à l'occupation du sol permettent d'établir des cartes de couverture des sols à un instant précis (tributaire par exemple de la date d'acquisition de l'image satellite) pouvant par la suite être intégrées dans des modèles de type biophysique (modèles climatiques, modèles hydrologiques,...).

-En revanche, les données d'utilisation du sol, de par leurs caractéristiques attributaires, sont utilisées comme des outils d'aide à la décision afin d'élaborer des plans d'aménagement et de gestion du territoire.

	Données d'entrée	Résultats et analyses	Exploitation des données
Occupation du sol	-Images satellites -Relevés terrain	-Cartes d'occupation du sol (Raster) -Evolution diachronique et multi temporelle	-Intégration dans des modèles de type biophysique -scénarii prédictifs de la couverture végétale
Utilisation du sol	-Données alphanumériques de type socioéconomique -parcellaire cadastral -plan d'Occupation des Sols	-Cartes d'utilisation du sol (Vecteur) -Dynamiques des changements d'utilisation du sol	-Outils d'aide à la décision -Aménagement du territoire

Tableau 1- Différences entre les termes « Utilisation » et « Occupation » du sol pour la structuration et l'utilisation de données

Malgré ces différences sémantiques, les deux termes restent étroitement liés. La détermination de cartes d'occupation du sol à partir d'images satellites constitue ainsi la première étape pour établir un état des lieux d'un espace géographique. L'intégration de données exogènes de type vectorielle et alphanumérique à la couche occupation du sol autorise ensuite la création de classes d'utilisation du sol permettant d'affiner l'étude et la compréhension des dynamiques de la couverture terrestre. Les deux approches apparaissent donc complémentaires et indissociables pour une analyse pertinente des dynamiques spatiales d'un espace géographique.

Ainsi, la couverture hivernale des sols s'inscrit dans les deux définitions, car elle peut être analysée comme un état ponctuel du couvert végétal à un instant précis et également être perçu comme un état transitoire entre deux cultures principales avec une fonction économique propre.

1.1.1.2. Le suivi de l'occupation et de l'utilisation du sol

- Une préoccupation majeure

Les changements d'occupation et d'utilisation du sol résultent d'interactions complexes entre systèmes sociaux et systèmes environnementaux qui évoluent dans le temps (Figure 1). Tandis que les phénomènes climatiques et biophysiques ont été pendant longtemps les moteurs principaux des transformations des surfaces terrestres, l'homme est aujourd'hui à l'origine de la majeure partie des transformations qui affectent les écosystèmes terrestres (Steffen *et al.*, 2004).

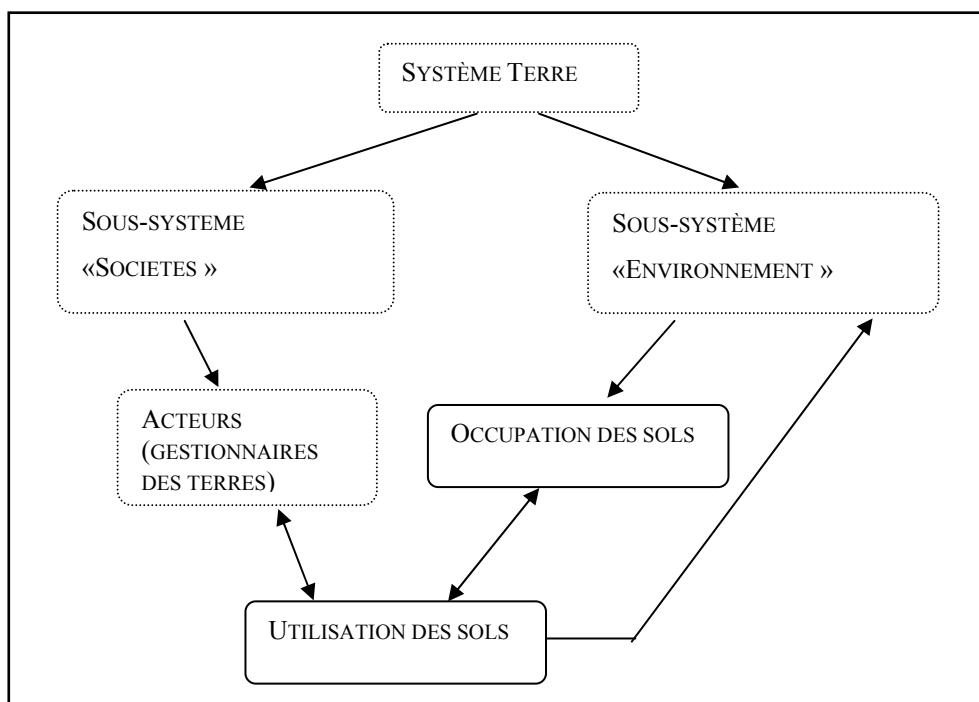
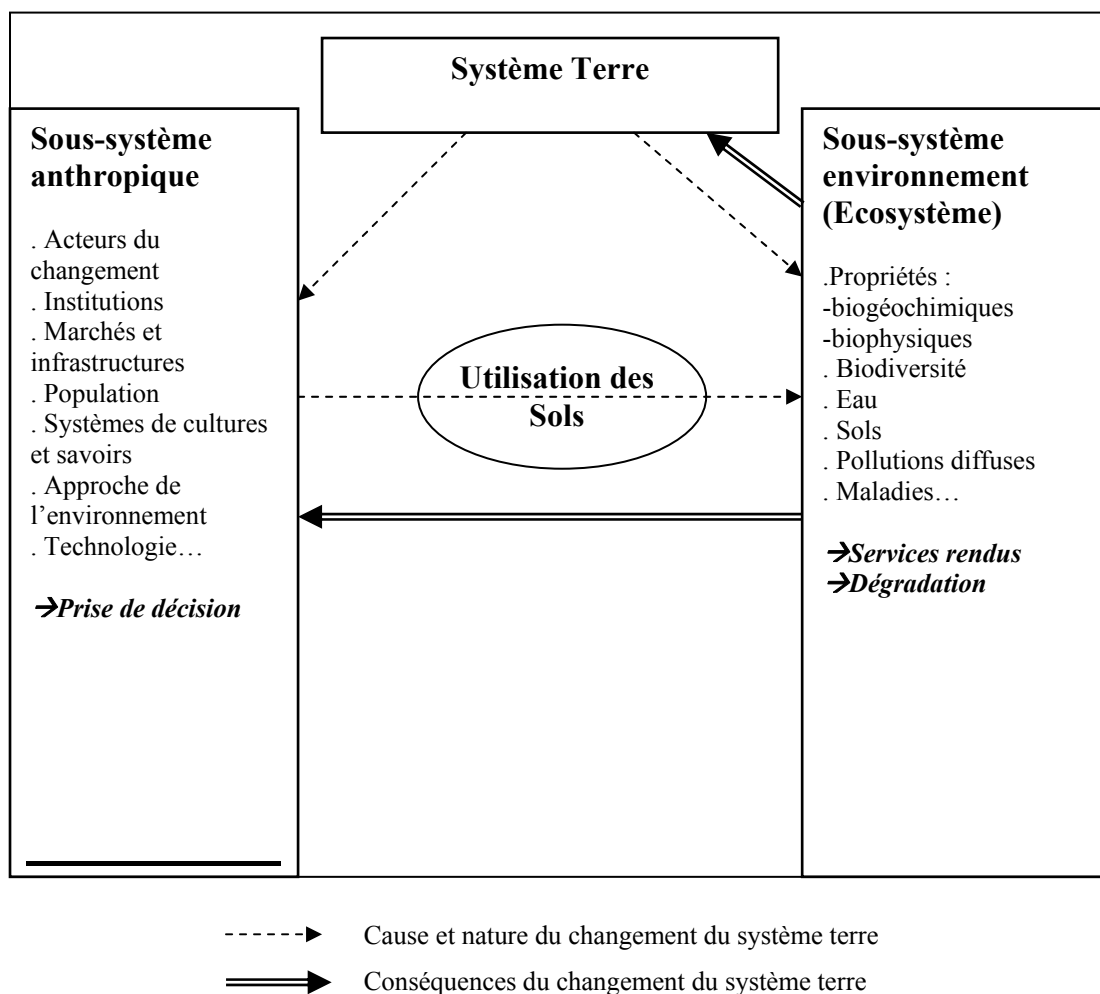


Figure 1- Cadre conceptuel de l'occupation et de l'utilisation des sols (Hubert-Moy, 2004)

Les changements intervenant dans les modes d'occupation et d'utilisation des sols engendrent des impacts au niveau des processus qui contrôlent les écosystèmes (Figure 2), qu'il s'agisse de conversions, c'est-à-dire du passage d'une catégorie d'occupation ou d'utilisation à une autre, ou de modifications qui représentent une évolution à l'intérieur d'une même catégorie suite à des changements affectant ses attributs physiques ou fonctionnels. Par exemple, l'extension des cultures au détriment des surfaces boisées engendre une augmentation du ruissellement de surface et par extension de l'érosion. L'intensification de l'usage des terres, à travers l'emploi massif d'engrais, de fertilisants et de produits phytosanitaires, entraîne des impacts environnementaux, parmi lesquels une forte dégradation de la qualité de l'eau et des sols. Dans certaines régions, les aménagements effectués sur le territoire agricole majorent et accélèrent les transferts de flux et de matières vers les cours d'eau (drainage des zones humides, multiplication des drains et fossés, suppression du réseau bocager...). L'impact de l'occupation et de l'utilisation des sols sur l'environnement dans des régions d'agriculture intensive, thème largement présent dans la littérature scientifique, que ce soit dans des paysages ouverts de grandes cultures (Haith, 1976 ; O'Callaghan, 1996; Taraba *et al.*, 1996; Sheridan, 2002 ; Forsyth, 1999) ou dans des paysages de type bocager (Mérot et Jigorel, 1996; Cheverry, 1998), a été démontré. Le rôle de structures paysagères telles que les haies et les zones humides de fonds de vallées sur le milieu et en particulier sur la qualité de l'eau, est aujourd'hui également bien reconnu, même si peu d'études spécifiques en ont mesuré précisément les impacts (Mérot, 1999 ; Caubel-Forget *et al.*, 2001 ; Viaud, 2004).



D'après Ojima Moran et al., 2004, in Hubert-Moy, 2004

Figure 2- Causes et conséquences des changements d'occupation et d'utilisation des sols

-Le questionnaire lié à la détermination des dynamiques d'occupation et de l'utilisation des sols

L'identification et le suivi de l'évolution de l'occupation du sol pose d'emblée des questions relatives aux échelles spatio-temporelles utilisées : A quelles échelles les processus interviennent-ils et sont-ils perceptibles ? Quelles sont les échelles d'observation disponibles et/ou souhaitables ? Comment peut-on passer d'une échelle à l'autre ? En plus des questionnements liés aux échelles spatiales, la détermination des dynamiques de l'occupation et de l'utilisation des sols soulève le problème de la prise en compte du temps dans les processus d'observation et de suivi : il s'agit en particulier de déterminer si les systèmes territoriaux étudiés, sont en phase de stabilité ou d'instabilité sur une période donnée, c'est-à-dire repérer des constantes, mais aussi des ruptures ou des discontinuités. Ces recherches ont pour ambition d'améliorer les connaissances thématiques sur les changements d'occupation et

d'utilisation des sols et des structures paysagères, mais aussi de développer des méthodes de traitement de données spatialisées permettant de mettre ces changements en évidence et de les simuler. Elles s'insèrent dans les problématiques de recherche actuelles de la géographie : elles se situent à l'interface nature/sociétés (la pression anthropique sur le milieu à travers la façon dont l'homme occupe et utilise les sols), elles traitent des dynamiques spatio-temporelles de territoires en visant à mettre en évidence la vulnérabilité de certains espaces vis-à-vis d'un risque environnemental.

La figure 3 illustre les différentes échelles spatio-temporelles d'analyse de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols par télédétection. La diversité des échelles d'analyse offertes par les capteurs permet aujourd'hui d'identifier et de suivre plus ou moins finement l'occupation du sol. Le passage d'une échelle à une autre reste cependant très complexe de par la nature même des données.

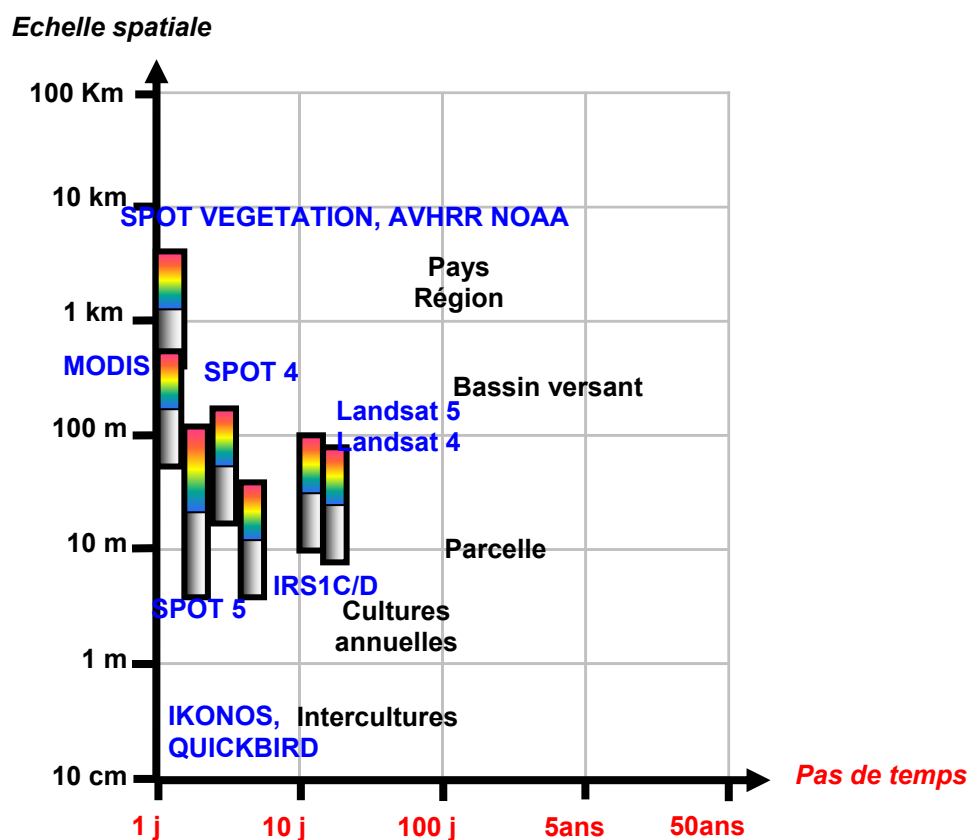


Figure 3- Représentation schématique des échelles de temps et d'espace aux quels les modes d'occupation et d'utilisation des sols sont étudiés par télédétection (d'après Hubert-Moy, 2004)

- la question centrale de l'intégration du suivi de l'occupation et de l'utilisation des sols dans des modèles de simulation

Les données de télédétection sont de plus en plus fréquemment intégrées dans des processus de modélisation. Dans ce contexte, plusieurs programmes internationaux ont vu le jour, parmi ces différents programmes, on peut citer le « National Research Council » (NRC), « International Geosphere-Biosphere Program » (IGBP), « International Human Dimensions Program » (IHDP) et « Land Use/Cover Change Program » (LUCC) qui découle et dépend des deux derniers...Tous ces programmes insistent sur l'importance de caractériser et modéliser les changements d'utilisation du sol et leurs dynamiques en relation avec l'étude des interactions Homme-Environnement. Les objectifs à atteindre sont donc multiples, ils doivent notamment permettre le développement des bases de données d'occupation et d'utilisation du sol à différentes échelles d'analyse (continentale, régionale et locale). Ces programmes doivent aussi favoriser la compréhension des changements d'occupation du sol en relation avec des données socio-économiques afin d'élaborer des modèles théoriques et des scénarii de simulation de l'évolution de l'occupation du sol. A ce niveau, des protocoles de validation et de reproductibilité des modèles doivent être mis en place pour évaluer la fiabilité des résultats. Enfin, une connexion de ces données avec d'autres modèles biophysiques devra permettre de qualifier et quantifier le plus précisément possible l'impact de ces changements d'évolution d'occupation du sol sur des phénomènes environnementaux spécifiques tels que la pollution des eaux, les processus biochimiques dans les sols, le climat, etc.

En particulier, le programme LUCC est un projet international interdisciplinaire ayant pour objectif principal l'amélioration de la compréhension des changements d'occupation du sol et spécifiquement, de l'approche modélisatrice de ce phénomène. Ainsi, trois thèmes principaux sont abordés dans ce programme représentatif des axes de recherche actuellement en cours sur le suivi de l'occupation et de l'utilisation des sols :

→ L'identification des « zones sensibles » d'un point de vue environnemental grâce à différents outils d'analyse comme la télédétection, les Systèmes d'Information Géographiques, les modèles de spatialisation,...

→ L'étude des dynamiques d'occupation du sol où sont appréhendées les questions relatives à la compréhension des changements d'utilisation du sol à travers différentes disciplines (Ecologie, Démographie, Histoire, Economie rurale...).

→ La modélisation des changements de l'occupation du sol et leur intégration dans des modèles de type biophysique (hydrologique, climatique, biogéochimique,...) afin de mesurer l'impact des changements d'utilisation du sol sur ces derniers.

Les recherches entreprises dans le cadre de ce travail s'insèrent dans les trois thèmes de ce programme.

1.1.2. Le suivi de l'évolution de l'occupation du sol en Bretagne : un enjeu environnemental majeur

Première région agricole française et parmi les plus intensives en Europe, la Bretagne a connu un bouleversement important au niveau agricole, passant en cinquante ans de la ferme à la ferme, selon le modèle agricole breton décrit par C. Canévet (1992). Ces mutations ont entraîné de forts impacts sur l'environnement et en particulier sur la qualité de l'eau.

1.1.2.1. La Bretagne, première région agricole française

-Une évolution radicale de son agriculture

La Bretagne, région maritime située à l'ouest de la France a connu depuis les années 1950 un changement radical de ses pratiques agricoles, passant d'une agriculture familiale classique à une agriculture moderne de type intensive (Canevet, 1992).

Historiquement, les producteurs bretons possédaient de petites exploitations et les caractéristiques agronomiques de leurs sols étaient généralement moins favorables que celles des régions voisines. En 1950, ils représentaient ainsi 9% des exploitations agricoles françaises mais n'assuraient que 7% de la production nationale. C'est à partir des années 1960, sous l'impulsion d'une nouvelle génération de responsables agricoles, que l'agriculture bretonne connaît ses premières transformations. Accompagnés par les pouvoirs publics, les agriculteurs bretons entreprennent de faire face au déficit structurel qui caractérise la région à travers différents moyens : la modernisation des infrastructures de transport (constructions de voies express gratuites, voies ferrées,...), un encadrement accru des exploitations agricoles (ingénieurs agronomes, conseillers techniques,...) et le développement des industries agro-alimentaires et agro-industrielles. Un modèle de développement agricole original, basé sur une intensification des moyens de productions végétales et animales, se met peu à peu en place en Bretagne.

Ce développement permet à la Bretagne de prendre à partir des années 1970 la première place en terme de chiffre d'affaires (8,7% de la production française) et malgré des fluctuations importantes de la valeur des productions agricoles, cette première place est consolidée au cours de années 1980 et 1990. La Bretagne est ainsi devenue en trente ans la première région agricole française sur le plan économique avec près de 14% du chiffre d'affaires de l'agriculture nationale. Cette richesse économique repose principalement sur les productions animales (90% du chiffre d'affaires régional) basée notamment sur l'intensification des moyens de production sur de faibles surfaces (développement des activités hors-sol) et sur un développement des industries agro-alimentaires. La Bretagne

produit ainsi plus de 50% de la production de viande de porc et de volailles de France ainsi que le quart de la collecte laitière (Agreste, 2003). Les rendements des productions végétales ont également fortement progressé, ainsi pour le maïs, de 51 Q/ha (quintaux à l'hectare) en 1970, on obtient plus de 90 quintaux à l'hectare aujourd'hui (Le Clech, 1998). Même chose pour le blé tendre qui est passé de 35 Q/ha à plus de 70 Q/ha actuellement avec des maxima à 110 Q/ha. On attribue généralement la moitié de cette progression au progrès génétique et l'autre moitié à l'amélioration des techniques culturales. Ces dernières étant caractérisées notamment par l'utilisation parfois massive d'engrais et de pesticides. Cette remarquable évolution qui caractérise la région Bretagne s'est accompagnée par une baisse importante du nombre des exploitations agricoles. En 1955, on comptabilisait ainsi 197 368 exploitations agricoles et une surface agricole utile (SAU) de 1 951 720 ha. En 2000, le nombre d'exploitations a presque été divisé par 4 avec 51219 exploitations et une SAU de 1 701 568 ha (SCEES- Recensement de l'agriculture, statistique agricole annuelle). Elle reste cependant la première région française en terme de nombre d'exploitations et d'emploi dans les secteurs agro-alimentaires et agricoles (Bretagne-Environnement, 2003). La productivité, au vu de ces chiffres, a donc considérablement évolué depuis ces trente dernières années, ainsi entre 1971 et 1995, celle-ci a été multipliée par 5, moyenne très supérieure à la moyenne française, essentiellement du au fait que le volume agricole produit (animal et végétal) a cru beaucoup plus rapidement que dans les autres régions alors que la baisse de la main d'œuvre en Bretagne était du même ordre de grandeur que la moyenne nationale.

-Une économie fortement dépendante de son agriculture

L'économie bretonne est fortement tributaire de son activité agricole et de l'industrie agroalimentaire qui l'accompagne. En 2000, l'agriculture bretonne emploie 76 000 actifs, soit 7% de la population active de la région et contribue pour 6% à son produit intérieur brut (à l'échelle nationale, la population active agricole représente 3,4% des actifs et contribue pour 2,8% du PIB, Agreste, 2003). Clé de voûte de l'agriculture bretonne, les productions animales et végétales structurent toujours l'ensemble de la filière agroalimentaire régionale :

- Productions animales

Parmi les nombreuses activités agricoles, la production porcine constitue la première filière en Bretagne et produit 56% du volume national. La filière laitière vient en deuxième place mais, avec 21% de la production nationale la Bretagne se place là aussi au premier rang français. Autre activité phare en Bretagne, les produits de l'aviculture représentent la troisième filière avec 17% de la valeur des productions régionales, le Morbihan se situant au premier rang des départements français dans ce secteur. La production de viande bovine et les cultures légumières avec respectivement 10 et 8% de la valeur des productions régionales arrivent en quatrième et cinquième place. Comme pour la filière du lait, la filière « viande

bovine » a cessé de progresser depuis le milieu des années 1980 avec l'arrivée des quotas laitiers et se stabilise autour de 15% de la production nationale.

- Productions végétales

Les productions végétales occupent les 2/3 de la SAU régionales et sont fortement orientées vers les fourrages (308 000 ha de maïs, soit 18% de la SAU et 469 000 ha en prairies temporaires, soit 28% de la SAU, Bretagne Environnement, 2003). On constate cependant une baisse continue des surfaces fourragères depuis 1990 et un recul des superficies agricoles en général (Figure 4). De 73% de la surface agricole utilisée dans les années 1980, sa part est passée à 57% en 2000. Cette évolution s'explique principalement par la stabilisation des besoins fourragers en Bretagne destinés en grande partie à une production laitière sous quotas depuis 1984 associée à l'intensification de la Surface Fourragère Principale (SFP). La réduction de la SFP a laissé la place au début des années 1990 à un développement des surfaces cultivées en céréales, en incluant les jachères obligatoires de la Politique Agricole Commune (PAC), ces surfaces constituent désormais 36% de la SAU. Cette production céréalière en constante augmentation ne suffit cependant pas à l'approvisionnement des industries bretonnes d'aliments du bétail qui importent des volumes encore très importants. En revanche, les cultures légumières, en surface cultivée, arrivent en deuxième position après le Nord-Pas-De-Calais avec une production de près de 1 million de tonnes, les productions phares demeurent le chou-fleur et l'artichaut qui assurent 73% de la production nationale (Agreste, 2003).

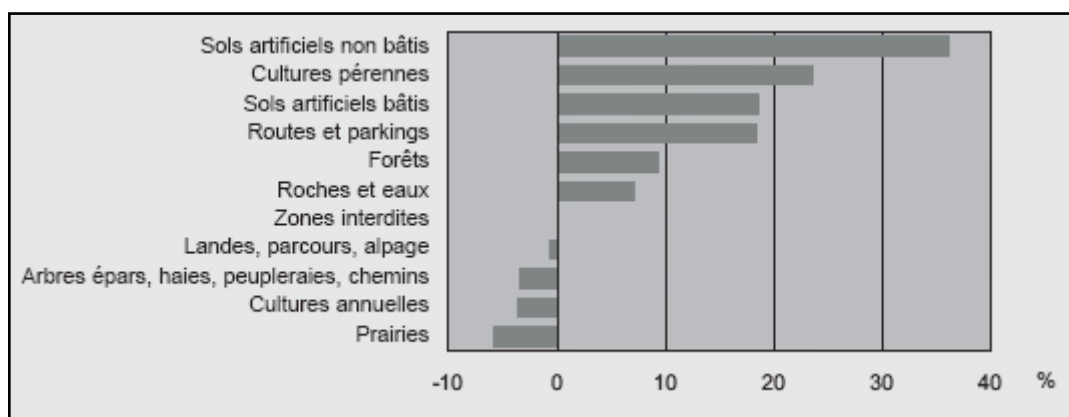


Figure 4-Variation des classes d'occupation du sol entre 1992 et 2002 (Agreste, 2003)

- Les industries agroalimentaires

Associé aux activités agricoles, les industries agroalimentaires emploient 60 000 salariés en Bretagne, soit 1/3 des emplois industriels de la région. Si la croissance globale des entreprises agroalimentaires atteint une valeur ajoutée proche de celle de l'agriculture, sa part

dans le chiffre d'affaire demeure relativement faible avec 14% contre 19% en moyenne en France. Rapportée aux effectifs salariés, elle est également plus faible que dans les autres régions françaises. Cette faible productivité apparente s'explique principalement par la prépondérance d'une industrie de première transformation orientée vers des productions peu élaborées mais grande utilisatrice de main d'œuvre.

L'agriculture bretonne, première en France, repose ainsi sur une intensification des productions animales, végétales et une industrie agroalimentaire puissante. Celle-ci la rend fortement sensible aux contraintes du marché économique, et son impact sur l'environnement met clairement en évidence les limites de ce modèle de développement.

-Une conjoncture économique très mouvante

La commercialisation de productions importantes sur des marchés faiblement organisés et fortement concurrentiels rend l'agriculture bretonne très sensible à la conjoncture. Ainsi, en 1999, la chute des prix agricoles et la contraction des volumes de production ont conduit à une forte baisse du revenu agricole breton. Le revenu par actif non salarié s'établissait alors à 12 700 €, soit 62% du revenu agricole moyen en France (Bretagne-Environnement, 2003). A l'inverse, la très bonne conjoncture de l'année 2001, dans les principaux secteurs agricoles que sont les activités hors-sol, les légumes et le lait, a permis de porter ce revenu à 22 000 €, un niveau supérieur à la moyenne française. La faiblesse structurelle des revenus agricoles, les programmes d'aide à la cessation de la production laitière, les contraintes financières de la PAC contribuent – parallèlement à la baisse des actifs agricoles liée aux départs en retraite non remplacés – par ailleurs à une réduction importante des exploitations agricoles dans la région. Entre 1988 et 2000, le taux moyen annuel de réductions des exploitations est de -4,8%, dépassant largement la moyenne nationale (-3,7%). La Bretagne se classe alors au cinquième rang en 2000 alors qu'elle occupait le premier rang des régions françaises en 1990. Ce rythme élevé de disparition a entraîné mécaniquement un agrandissement accéléré des exploitations agricoles. La taille moyenne des exploitations bretonnes est ainsi passée de 13 ha en 1970 à 33 ha en 2000, encore en deçà de la moyenne française qui est de 42 ha, mais avec une augmentation moyenne annuelle de 4,8% entre 1990 et 2000 contre 3,4% sur le reste de l'hexagone (Figure 5).

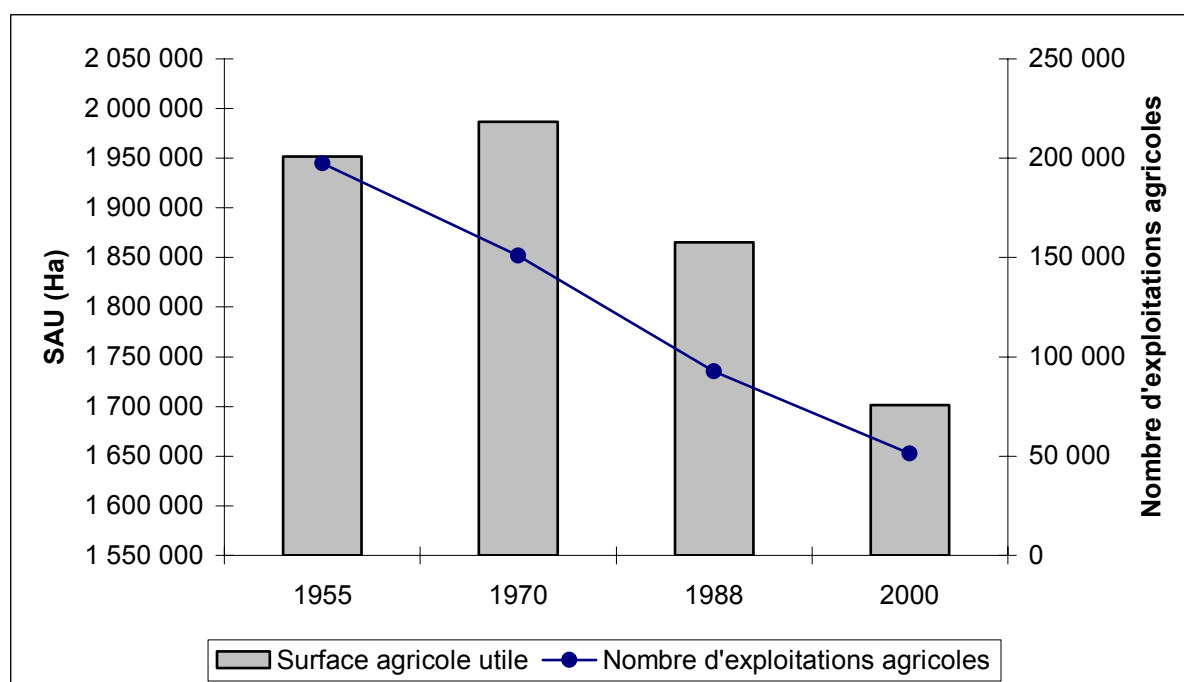


Figure 5- Variation du nombre d'exploitations agricoles et de la surface agricole utile entre 1955 et 2000 (Source : Bretagne Environnement, 2003)

D'un point de vue économique toujours, les institutions européennes de la PAC (Politique Agricole Commune) et de l'OMC (Organisation Mondiale du Commerce) devraient progressivement conduire à une baisse des aides publiques et à une réduction des protections douanières pour l'ensemble des productions. Dans ce contexte, l'agriculture bretonne risque de devoir continuer à se restructurer (réduction du nombre d'exploitations, recrutement de salariés agricoles, optimisation des pratiques d'élevage et d'agronomie,...). Le principal défi est actuellement de maintenir une activité agricole viable économiquement tout en préservant l'environnement.

1.1.2.2. Les pollutions d'origine agricole et leurs impacts sur l'environnement

Les conséquences d'une agriculture basée sur l'intensification de l'élevage et des productions fourragères sur l'environnement sont à présent identifiées et bien connues : pollution de l'eau et des sols par les excédents azotés, eutrophisation des cours d'eau et des littoraux, érosion et appauvrissement des sols, etc. De nouvelles réglementations environnementales européennes voient actuellement le jour et les agriculteurs bretons devront faire face à une augmentation inéluctable des coûts de préservation de l'environnement. Afin de concilier en Bretagne le respect de l'environnement mis à mal par les pollutions d'origine agricole et le maintien du potentiel économique, de nombreux programmes d'actions sont

lancés à différentes échelles pour un développement pérenne de l'agriculture et pour la reconquête de la qualité de l'eau.

En quarante ans, les rendements des productions végétales et animales ont connu une progression spectaculaire. On attribue généralement la moitié de cette augmentation au progrès génétique et l'autre moitié à l'amélioration des techniques d'élevage et culturales, celles-ci correspondant notamment au développement des activités hors-sol et de l'utilisation d'engrais et de pesticides. L'application massive de ces techniques de production joue un rôle majeur, et aujourd'hui connu, dans la dégradation de la qualité de l'eau et des sols, mais les eaux pluviales urbaines et assainissements individuels ont également un impact qui fait l'objet de recherches de plus en plus nombreuses. Parmi les pollutions d'origine agricole, trois éléments majeurs sont identifiés : les nitrates, les phosphates et les produits phytosanitaires.

-Les nitrates

La quantité d'azote apportée aux cultures sous forme organique ou minérale demeure largement excédentaire en Bretagne (Agreste, 2003). Comparée aux quantités d'azote prélevées par les cultures et les prairies, l'excédent avoisine 103 000 tonnes en 2001. Rapporté à la surface fertilisable de la Bretagne, cela représente ainsi un excédent moyen de 64 kg/ha (Figure 6).

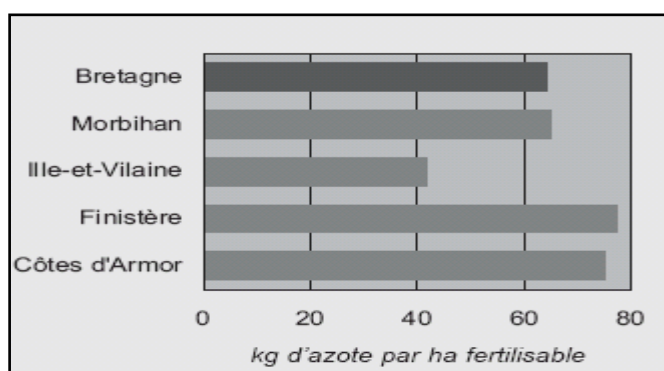


Figure 6- Excédent azoté de la fertilisation minérale en Bretagne en 2001 (Agreste Bretagne, 2003)

La pollution des eaux par les nitrates en excédent fait l'objet d'un suivi particulier de par son évolution depuis 30 ans. La figure 7 illustre l'évolution de la concentration moyenne en Bretagne en nitrates. On note une croissance régulière jusqu'en 1988, dépassant les 25mg/l (valeur guide européenne) en 1982. Ces dernières années, une inflexion de cette tendance est remarquée avec une diminution notable de la concentration à partir de 1999 (en 2002, la moyenne estimée à partir des données du réseau National de Bassin, est de 27,7 mg/l).

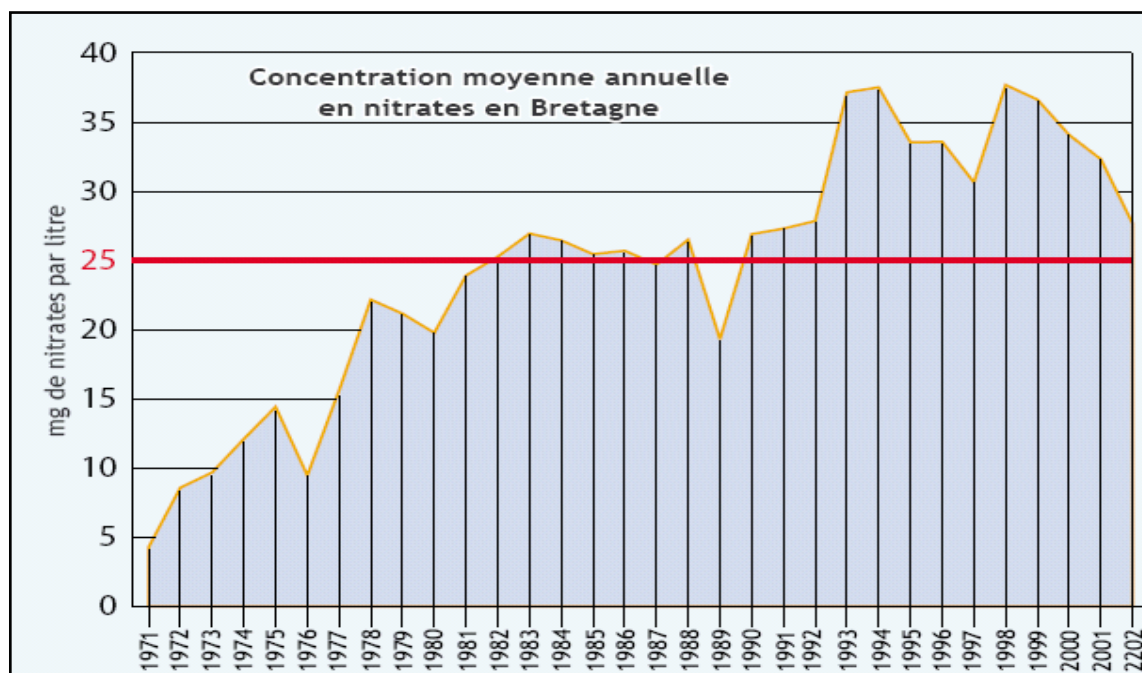


Figure 7- Concentration moyenne en nitrates en Bretagne (Source : DIREN, Bretagne, Agence de l'Eau Loire-Bretagne)

Le rôle de l'agriculture intensive dans l'accroissement des teneurs en nitrate des eaux est connu depuis longtemps. En 1980, le rapport Hénin, réalisé à partir d'un bilan global, estimait cette responsabilité à plus des deux tiers, les autres sources étant les rejets domestiques et industriels. Les pollutions d'origine agricole correspondent à deux pratiques culturelles majeures caractéristiques de l'agriculture intensive :

- L'utilisation d'engrais.

On entend par le terme engrais, « tout produit naturel ou manufacturé utilisé par l'agriculture afin d'entretenir ou d'améliorer la fertilité des sols » (Vilaginès, 2000). Les engrais se présentent sous différentes formes :

→ Les engrais azotés organiques, dits engrais « de fond » d'action lente car étant insolubles dans l'eau, ils libèrent petit à petit leur azote.

→ Les engrais azotés ammoniacaux

→ Les engrais azotés nitriques

→ Les engrais ammoniaconitriques sont les plus utilisés de part leur prix avantageux et par leur souplesse d'emploi. Leur utilisation n'a cessé d'augmenter depuis les années 1960. Ainsi, en 1970, les doses avoisinaient les 49 kg d'azote à l'hectare contre plus de 150 kg d'azote à l'hectare aujourd'hui (Le Clech, 1998).

- La pratique des épandages

Une des fonctions de base de l'élevage français était la production de fumier et son épandage sur les terres agricoles constituait jusque dans les années 1960 la principale, voire la seule méthode d'amendement des terres. La production animale étant faible, les risques liés à une mauvaise gestion des fumiers et effluents d'élevage étaient minimes. Le développement des activités hors-sol (volaille, porc,...) dans les années 1970 a considérablement changé la donne. La production des effluents d'élevage est aujourd'hui telle que dans certains cantons, la charge en azote d'origine animale est supérieure au plafond de la directive nitrates, c'est-à-dire, 170 kg d'azote organique par hectare et par an. Ces espaces correspondent à des Zones d'Excédent Structurel (ZES), qui touchent en 2003, 104 cantons en Bretagne, soit 2/3 de la SAU régionale en ZES (Agreste, 2003). Cette diminution résulte des nombreux programmes lancés pour améliorer la qualité de l'eau en Bretagne.

Autre impact significatif de l'agriculture intensive, l'évolution de la teneur en azote des sols. Au cours des 40 dernières années, la Bretagne est passée d'une situation déficitaire en azote par rapport aux besoins des cultures à une situation très excédentaire pour les seules déjections animales. L'excédent d'azote rejeté dans les eaux bretonnes, est ainsi estimé à plus de 110000 tonnes d'azote par an. Si cette présence est essentielle à la production culturale, une quantité excessive accroît les risques de contamination des eaux de surface souterraines et donc littorales. En effet, si les apports (lisier, fumier, engrais) dépassent les capacités d'absorption des plantes, des nitrates peuvent migrer dans le sol et atteindre les eaux. Les conséquences les plus visibles : une eau non potable, une eutrophisation des rivières et la prolifération des algues vertes sur le littoral.

-Les phosphates

Le phosphore est la cause première de l'eutrophisation des cours d'eau et de certains littoraux mais seulement 22% des quantités déversées en France seraient liées à l'activité agricole (48% d'origine domestique et 30% d'origine industrielle). Contrairement aux nitrates, les différentes formes de phosphore sont assez peu solubles et se fixent facilement sur les particules, le lessivage dépasse ainsi rarement 1 kg/ha/an, par contre, le ruissellement superficiel et l'érosion peuvent conduire à des départs importants. Comme pour l'azote, la présence des phosphates dans les sols en Bretagne n'a cessé d'augmenter avec le développement de l'agriculture intensive (Agreste, 2003). Des sols plutôt carencés à la fin de la seconde guerre mondiale, la tendance s'est inversée au début des années 1980 et nombre de sols ont basculés dans l'excès. A ce jour, la teneur moyenne dans les sols de Bretagne est de près de 400 mg/kg de terre alors que la teneur en phosphore assimilable (P_2O_5) recommandé en agronomie est de 220-240 mg/kg de terre. Plus de la moitié des communes bretonnes aurait des sols trop riches en phosphore, notamment dans les zones légumières et les zones d'élevage intensif (Le Clech, 1998). Concernant la matière organique, la Bretagne possède

des sols généralement riches en matière organique mais inégalement pourvus : de 2 à 8%. Elle constitue une source d'éléments nutritifs pour les plantes et joue également un rôle important sur la structure du sol et son activité biologique. Sa diminution a des conséquences sur le ruissellement des eaux de pluie, l'érosion des sols et par conséquent sur la dispersion des polluants. Depuis 30 ans, la tendance de la concentration de la matière organique est à la baisse avec une diminution moyenne de 0,6% tous les 10 ans.

- Les produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires (Figure 8) ont connu également une évolution fulgurante dans les années 1950 avec le développement de la chimie de synthèse (Le Clech, 1998). Visant à protéger les cultures des maladies, adventices et « nuisibles », les tonnages épandus ont été multipliés par deux en France depuis 1960. Environ 4,5 kg/ha/an de produits phytosanitaires sont ainsi épandus en moyenne mais certaines productions spécifiques comme l'horticulture intensive peuvent en utiliser près de 50 kg/ha/an. Les produits phytosanitaires sont de nature différentes (atrazine, diuron,...) et possèdent des formes multiples (liquide, gazeux, solide). Leur épandage a un effet plus ou moins direct sur la qualité de l'eau car plusieurs phénomènes peuvent survenir :

- Volatilisation
- Entraînement par ruissellement, soit en solution, soit absorbés par les particules
- Entraînement par lessivage
- Immobilisation par absorption sur les argiles ou les matières organiques
- Dégradation physico-chimique ou biologique par les micro-organismes du sol

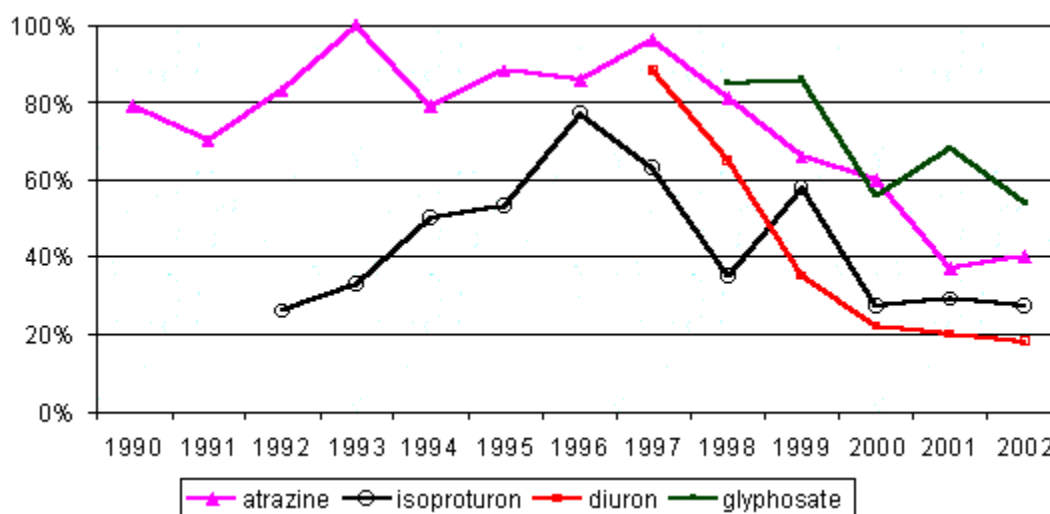


Figure 8- Fréquence de dépassement du seuil réglementaire de 0,1µg/l pour les molécules les plus fréquemment repérées dans l'eau des rivières du réseau CORPEP (in Hubert-Moy, 2004 ; source : Bretagne-Environnement, 2003)

Les conséquences de l'usage des produits phytosanitaires sur l'environnement, de par la multiplicité des processus évoqués ci-dessus, sont difficiles à mesurer. On remarque cependant que la simplification des systèmes de culture et l'utilisation répétée de certains herbicides ont conduit à une évolution de la flore, conséquence de l'utilisation abusive et systématique du désherbage chimique. Dans ce cas, les répercussions techniques sont lourdes et entraînent une complication notoire des interventions, avec évidemment des retombées économiques négatives. Ainsi, on note un phénomène de résistance de certaines plantes aux pesticides, rare en 1950, il concerne aujourd'hui plusieurs espèces adventices et de ravageurs (Le Clech, 1998). Ce risque d'apparition de la résistance est d'autant plus élevé que la matière active du produit à un site d'action unique. Il en résulte en quelques années une baisse progressive de la persistance agronomique du produit et par conséquent une chute d'efficacité. Bien que le phénomène soit encore limité, d'autres cas ont été signalés dans le monde et illustrent les dangers de la combinaison monoculture – monotraitement.

- Les programmes d'action

Les impacts de l'activité agricole intensive étant d'un point de vue environnemental identifiés et pour certains types de pollution (nitrates, phosphores) quantifiés, de nombreux programmes pour la restauration de la qualité de l'eau ont vu le jour (Tableau 2).

12 décembre 1991	Directive Nitrates
14 septembre 1994	La Bretagne est classée zone vulnérable
1994	Délimitation des ZES (71 cantons)
Fin 1995-1996	Premiers programmes de résorption
Entre 1996 et 1998	Premiers programmes d'action directive Nitrates (1996-2001) Le cahier de fertilisation devient obligatoire
janvier 1998	Circulaire VOYNET- LE PENSEC : seuils d'obligation de traitement et plafonnement des surfaces d'épandage
23 octobre 2000	Directive cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau
20-23 juillet 2001	Deuxième programme d'action directive Nitrates : délimitation des zones d'actions complémentaires comprenant notamment: - l'obligation de couverture des sols d'hiver, - la limitation des apports d'azote totaux à 210 kg/ha/an
31 décembre 2001	Date limite de demande de mise en conformité au titre de la réglementation des installations classées des exploitations avicoles et bovines. [arrêts ministériels sur les installations classées]

Chapitre 1. Suivi et prédiction de la couverture hivernale des sols en Bretagne

31 mars 2002	Le plan de fumure prévisionnel est obligatoire pour les jeunes agriculteurs qui s'installent, pour toute exploitation nouvellement soumise à autorisation ou à déclaration au titre de la réglementation sur les installations classées, et pour les exploitations ayant bénéficié d'un arrêté de subvention dans le cadre du PMPOA. [second programme d'action directive Nitrates de Bretagne – juillet 2001]
30 juin 2002	Les exploitations avicoles doivent avoir déposé un dossier complet d'autorisation ou de déclaration au titre des installations classées
26 juillet 2002 (56) 1er août 2002 (22 – 29 – 35)	Arrêtés complémentaires aux deuxièmes programmes d'action directive Nitrates : révision des ZES et 2ème programme de résorption (104 cantons en ZES). Application immédiate aux exploitations déjà concernées par le 1 ^{er} programme de résorption, avec calendrier d'adaptation pour les exploitations déjà engagées dans un projet, en cas de changement de règle dans le canton.
20 décembre 2002	L'ensemble des exploitations bretonnes doit respecter un apport maximum de 170 kg d'azote d'origine organique par ha de surface épandable et par an [directive Nitrates de 1991]
31 décembre 2002	Date limite de dépôt de dossier résorption pour les exploitations > 17 500 U azote dans les nouveaux cantons ZES
31 décembre 2002	Les exploitations bovines doivent avoir déposé un dossier complet d'autorisation ou de déclaration au titre des installations classées
31 décembre 2002	Date limite de déclarations d'engagement des élevages dans le PMPOA [décret n° 2002-26 du 4 janvier 2002]
31 mars 2003	Le plan de fumure prévisionnel est obligatoire pour toutes les exploitations en ZAC (en 29 : et dans les BV BEP et BV ulves) La méthode d'élaboration des plans de fumure doit être agréée par le préfet
30 juin 2003	Date limite de dépôt de dossier résorption pour les exploitations de 15 000 à 17 500 unités d'azote en nouveaux cantons ZES
30 juin 2004	Date limite de dépôt de dossier résorption pour les exploitations de < 15 000 unités d'azote dans les nouveaux cantons en ZES
Courant 2004	Troisième programme d'action directive Nitrates : 2004-2007 (4 ans)
31 mars 2005	Le plan de fumure prévisionnel est obligatoire pour l'ensemble des exploitations bretonnes [programmes d'action directive Nitrates de Bretagne – juillet 2001]
31 décembre 2006	Date d'achèvement de la résorption dans les zones d'excédent structurel : les solutions de traitement doivent avoir été mises en place
31 décembre 2006	Date limite pour l'engagement financier au titre du PMPOA
Courant 2008	Quatrième programme d'actions : 2008-2011 (4 ans)
31 décembre 2008	Date limite de paiement au titre du PMPOA
2015	Les objectifs de qualité de la directive cadre du 23 octobre 2000 établissant un cadre communautaire pour une politique de l'eau doivent être atteints

Source : Préfecture Région Bretagne

Tableau 2- Reconquête de la qualité de l'eau en Bretagne : échéancier des dispositions réglementaires concernant la réduction des pollutions d'origine agricole

Parmi ces programmes, on distingue les actions réglementaires et les actions contractuelles. On retrouve dans les actions réglementaires la protection des points de captage, des puits et des forages, application de la directive « Nitrates » avec les zones d'action complémentaires (ZAC) et les Zones d'Excédent Naturel (ZES). Les actions contractuelles sont multiples ; elles correspondent à des Contrats d'agriculture durable, des Contrats de rivières (comité de bassins versants), contrats de baie, au Programme Bretagne Eau Pure, SAGE, SDAGE, Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole (PMPOA), Directive « Nitrates »...

Parmi les actions lancées pour la reconquête de la qualité de l'eau, la directive « Nitrates », datée du 12 décembre 1991, et élaborée par le Ministère européen de l'environnement définit à travers un « code de bonne pratique agricole » un cadre minimal de dispositions dont la mise en œuvre est obligatoire dans les zones vulnérables. Les zones vulnérables sont des surfaces agricoles alimentant des ressources en eau déjà polluées ou susceptibles de l'être à terme. En 1998, elles couvrent 46% de la SAU nationale et concernent 441 000 exploitations. Les principales dispositions de ce code de bonne pratique agricole concernent en premier lieu les périodes où l'épandage de fertilisants est inapproprié. Un calendrier agricole est ainsi réalisé pour chaque culture selon les types de fertilisants utilisés. Les restrictions des épandages (sols en pente, inondés, émergés...) font l'objet du deuxième point d'action. Les conditions d'épandage des fertilisants sont ici précisées, l'élaboration des plans de fumure des parcelles et la tenue d'un registre d'épandage y est obligatoire.

A l'échelle régionale, le programme Bretagne Eau Pure, est lancé en 1990 par les acteurs publics de la lutte contre les pollutions de l'eau : Etat, Conseils Généraux, Conseil Régional, Agence de l'eau, sous la forme d'un programme pluriannuel intégré au Contrat Plan Etat-Région. Les actions s'articulent autour de trois thèmes : restauration de la qualité de l'eau par bassin versant, expérimentation et recherche appliquée et enfin des actions de formation, d'information et d'animation. A ce titre, pour le Contrat de Plan 2000-2006, 44 bassins versants en Bretagne sont concernés par ce programme.

L'ensemble de ces programmes comprend des mesures qui préconisent, voire contraignent, l'implantation de couverts végétaux en hiver sur les parcelles agricoles.

1.2. Le cas particulier de la couverture hivernale des sols

La couverture hivernale des sols en Bretagne correspond à une période transitoire de l'utilisation et de l'occupation des sols. Caractérisé généralement par un climat frais et pluvieux, l'hiver breton impose une période de « repos » cultural, rendant la gestion de l'interculture durant cette période stratégique d'un point de vue agronomique et

environnemental. La diversité des modes de gestions durant ce laps de temps aux limites incertaines en fait également un thème d'occupation du sol complexe.

1.2.2. Problématiques liées à la couverture hivernale des sols en Bretagne

1.2.2.1. Un thème sensible

En Bretagne, la couverture hivernale des sols s'inscrit dans une période transitoire de l'utilisation des sols pour l'ensemble des systèmes de production agricole. Elle offre ainsi un panel de gestion culturale ayant des impacts plus ou moins directs sur l'environnement, notamment au niveau des transferts de flux. Durant cette période, plusieurs processus d'accumulation et de transfert se combinent, pouvant entraîner des risques de fuite de polluants (nitrates, phosphores, produits phytosanitaires) vers les eaux. Trois phénomènes se produisent :

- un excédent pluviométrique contribuant au ruissellement et à l'infiltration renforcés par l'absence de protection des sols par un couvert végétal significatif (Gallien *et al.*, 1995 ; Martin, 1997). L'eau en excès durant la période de drainage entraîne partiellement le stock d'azote nitrique présent dans le sol. La concentration en nitrate de cette lame drainante correspond au rapport entre la quantité d'azote lessivée sur la période et le volume de la lame. Ainsi, le lessivage de 30 kg de N/ha par une lame drainante de 220 mm conduit à une concentration en nitrates de l'eau de 60 mg/l.
- la présence d'azote dans le sol sous forme nitrique. Celui-ci peut correspondre au reliquat d'azote de la culture qui comprend la part des fournitures du sol non absorbées par la culture et une partie des excédents éventuels de fertilisation, la minéralisation depuis la récolte, et les éventuels apports d'effluents organiques. Par ailleurs, d'éventuels apports d'azote issus d'épandage d'effluents peuvent venir enrichir cette concentration d'azote.
- l'absence de couverts végétaux susceptibles d'utiliser l'azote présent ou l'implantation de couverts végétaux avec de faibles capacités d'absorption.

D'autres paramètres venant contribuer à la pollution des eaux sont à prendre en compte : le type de sol, la profondeur, la pente,... Le tableau 3 montre ainsi l'impact de la profondeur des sols sur le lessivage des nitrates. Il contredit une idée largement répandue qui veut que les années pluvieuses soient propices à des niveaux de lessivage important de nitrates. Il apparaît au contraire que la « marge de manœuvre » sur le reliquat au début du drainage est extrêmement faible pour les sols superficiels sous un climat peu pluvieux, elle augmente par contre en cas d'automne et d'hiver très pluvieux par effet de dilution.

Pluviométrie hivernale	Type de sol	Lame drainante (mm)	Quantité d'azote lessivé conduisant à 50 mg/l (kg N/ha)	Reliquat début drainage (kg N/ha) conduisant à une concentration de 50 mg/l (norme française)
Moyenne	Profond	100	11	28
	Superficiel	200	22	31
Elevée	Profond	300	33	46
	Superficiel	400	45	51

Tableau 3- Impact de la profondeur des sols sur le lessivage de l'azote (Comifer, 2002)

Concernant les nitrates, deux types d'utilisation du sol durant la période hivernale apparaissent particulièrement sensibles :

- Les prairies

Couvrant près de 40% de la SAU bretonne, elles reçoivent presque toutes de l'azote sous forme de déjections bovines lors du pâturage (azote dite « non maîtrisable »). Les modèles dominants d'alimentation des bovins permettent d'estimer ces rejets indirects à 70 000 tonnes (Agreste, 2003). Rapportés à la surface totale des prairies, ces apports peuvent donc être évalués à près de 110 kg/ha. En complément, 27% des prairies reçoivent des effluents stockés pendant l'hiver et représentent approximativement près de 50 kg/ha sur l'ensemble des prairies. L'apport moyen total en matière organique se porte ainsi en moyenne à 160 kg/ha (Agreste, 2003). Pour assurer les besoins fourragers en herbe des animaux, les agriculteurs apportent sur 70% des prairies de l'azote minéral directement assimilable. Même si l'on note une baisse considérable des apports en azote minéral depuis les années 1970, ceux-ci restent très variables selon le nombre d'apport effectué (jusqu'à quatre par an sur une prairie) et oscillent entre 50 et 180 kg/ha, soit une moyenne de 70 kg/ha. Enfin, il faut tenir compte de la fixation de l'azote par les légumineuses, estimée à 40 kg/ha, les entrées d'azote total sur les prairies bretonnes avoisinent ainsi les 270 kg/ha, ce qui dépasse largement les sorties liées à la consommation d'herbe, estimées à plus de 180 kg/ha en 2001. Le couvert végétal permanent des prairies réduit cependant davantage les risques de lessivage que les cultures annuelles qui laissent souvent les sols nus à peu couverts après la récolte. Le solde annuel d'azote reste ainsi en partie stocké dans le sol sous forme organique ou dans l'herbe non consommée. Le risque de « déstockage » du surplus azoté vient donc seulement après la mise en culture de la prairie qui conduit à une minéralisation importante de ce stock de matière organique dans les mois qui suivent la destruction de la prairie (Comifer, 2002). Si le

plan de fumure ne prend pas en compte ce phénomène de déstockage, les risques de lessivage deviennent alors très élevés et peuvent atteindre de 100 à 200 kg/ha selon les travaux de recherche effectués.

- Les sols nus après cultures

Les sols nus à peu couverts qui suivent généralement les récoltes de maïs (27% de la SAU bretonne) et céréales constituent également des espaces sensibles (Comifer, 2002). L'ensemble des parcelles de maïs en Bretagne bénéficie d'un apport moyen en azote organique de 180 kg/ha, quantité qui dépasse déjà les besoins totaux de la plante estimés à 160 kg/ha (Agreste, 2003). Si théoriquement, il n'est donc pas nécessaire de compléter cette dose par de l'azote minéral, car les fournitures naturelles d'azote par le sol compensent le fait que l'azote organique n'est pas immédiatement assimilable par le maïs dans la pratique, 80% des parcelles ayant déjà reçu de l'azote organique, bénéficient d'un apport minéral (Agreste, 2003). Ces apports se font essentiellement au moment du semis où la dose varie entre 30 et 80 kg/ha selon le nombre d'apports effectué. Rapporté à la surface totale des parcelles de maïs, l'apport minéral représente environ 37 kg/ha en 2001, en diminution là aussi puisqu'il était de 60 kg/ha en 1994. Au total, le solde entrées-sorties d'azote sur le maïs atteint 64 kg/ha, quantité importante qui risquent fort d'être lessivée dans les sols (Agreste, 2003).

1.2.2.2. L'implantation d'une interculture comme moyen de lutte contre les pollutions d'origine agricole

Les intercultures sont classiquement définies comme des cultures qui couvrent le sol entre deux cultures annuelles, de la récolte jusqu'au semis de printemps, afin de le protéger de l'érosion et de la perte de nutriments par le lessivage et le ruissellement (Reeves, 1994). L'implantation d'intercultures répond ainsi principalement à des logiques de lutte contre l'érosion (Le Bissonnais *et al.*, 1998) et le lessivage de l'azote (Meisinger *et al.*, 1990 ; Muller *et al.*, 1987 ; Meisinger *et al.*, 1991). De nombreux travaux ont montré que l'implantation d'intercultures présente un intérêt pour d'autres raisons, parmi lesquelles la suppression des adventices (Creamer *et al.*, 1996 ; Putman, 1990), la lutte contre les maladies des cultures (Rothrock et Kending, 1991), l'amélioration de la qualité des sols (Reeves, 1997 ; Reicosky et Forcella, 1998). La présence d'intercultures et plus généralement de couverture hivernale des sols influent sur la qualité de l'eau et des sols (Dabney *et al.*, 2001).

Concernant la qualité de l'eau, les intercultures influent sur différents polluants :

-Les intercultures, appelées Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates (CIPAN), permettent d'une part la récupération des reliquats d'azote minéral dans le sol et d'autre part l'absorption de l'azote minéralisé au cours de l'automne et provenant notamment de fumures

organiques (Comifer, 2002). La quantité et la durée de prélèvement de l'azote par les CIPAN dépend de la disponibilité d'azote dans le sol, du climat, du type d'interculture implanté, de ses dates d'implantation et de destruction (Groffman *et al.*, 1987 ; Shipley *et al.*, 1992 ; Clark *et al.*, 1994). De façon générale, les intercultures connaissent une période de développement rapide en automne, suivie d'un ralentissement voire d'une stagnation au cours de l'hiver, puis d'un redémarrage rapide qui entraîne un nouveau prélèvement d'azote, s'il en reste, dans les sols. Les CIPAN les plus efficaces sont des graminées (ex : ray-grass, seigle, avoine), des crucifères (ex : moutarde, radis, navette), et des borraginacées (ex : phacélie). Plusieurs études ont montré qu'elles peuvent réduire la quantité d'azote lessivé d'environ 60% en moyenne (Meisinger *et al.*, 1991). Elles prélèvent environ trois fois plus d'azote que les légumineuses dans la mesure où elles se développent plus rapidement en automne. En outre, les légumineuses, qui fixent l'azote atmosphérique, contribuent à un apport d'azote dans le système, même si cela constitue un effet bénéfique sur la culture suivante. La plupart des études soulignent que du bon développement en biomasse et de l'implantation précoce en tout début d'automne des intercultures dépend leur efficacité à récupérer l'azote qui sera re-libéré l'hiver pour la culture suivante (Comifer, 2002). Le principal problème posé par les intercultures est la maîtrise de l'alimentation azotée de la culture suivante ; des problèmes de reconstitution de la réserve en eau du sol et de calendrier de travail peuvent également se poser.

-L'impact des intercultures sur l'usage des pesticides varie selon les pratiques agricoles qui leur sont appliquées. Ainsi, la présence de ces couverts végétaux peut limiter le développement des adventices dans la culture suivante, notamment des mauvaises herbes vivaces les plus difficiles à détruire, et en conséquence rendre inutile le recours aux herbicides. A l'inverse, si les intercultures sont difficiles à gérer par l'agriculteur, l'usage des herbicides peut être très important et entraîner de forts risques de transfert de flux polluants vers les cours d'eau (Griffin et Dabney, 1990). L'efficacité de l'interculture est d'autant plus importante que le couvert implanté est dense et reste longtemps en place sur les parcelles (Smeda et Putnam, 1988), et que l'interculture est vivante, la nécromasse étant moins active vis-à-vis du développement des adventices (Fisher et Burrill, 1993). Des études ont également montré le rôle bénéfique des résidus de cultures dans la suppression des adventices (Hoffman *et al.*, 1996 ; Moyer *et al.*, 2000).

- L'utilisation généralisée des couverts végétaux hivernaux a montré qu'ils permettent aussi de minimiser les pertes en phosphore et de limiter les phénomènes d'érosion (Cisci et Martinez, 1993) en réduisant l'arrachement des particules de sol par les pluies (Moss, 1989).

La présence de couverture hivernale des sols et en particulier l'implantation d'intercultures influence également la qualité des sols. Ces dernières jouent un rôle

prépondérant dans l'agriculture de conservation à tel point que les couverts végétaux deviennent un élément clé de ces techniques.

-Les intercultures contribuent au stockage du carbone dans les sols et par voie de conséquence à l'amélioration de la qualité des sols (Lal *et al.*, 1998). La pratique de l'engrais vert, durant les intercultures suffisamment longues (entre une récolte d'été et un semis de printemps), représente une solution intéressante en terme de stockage : 0,15 tC/ha/an (Arrouays *et al.*, 2002). L'enherbement permanent des inter-rangs engendre un stockage additionnel de carbone : par exemple, dans les vignes et vergers il est presque équivalent à celui induit par la conversion d'une terre labourée en prairie permanente, soit environ 0,4 tC/ha/an. L'extension de cette pratique pourrait être envisagée, en tenant compte de l'effet de compétition pour l'eau et l'azote entre la plante de couverture et la culture, des impacts éventuels sur les rendements de la culture, du développement éventuel de parasites que le maintien d'un couvert herbacé pourrait favoriser. L'apport des CIPAN en terme de matière organique peut paraître limité, mais elles contribuent à entretenir à long terme une dynamique de l'évolution de la matière organique favorable à la structure du sol (Kuo *et al.*, 1997).

-Les intercultures permettent également d'améliorer la structure des sols en évitant les phénomènes de battance et d'érosion liés à l'eau et au vent. Ils contribuent à la vie biologique des sols (Galvez *et al.*, 1995) et à l'amélioration des flux d'eau dans le sol en maintenant une porosité optimale et en évitant la compaction du sol pendant l'hiver. Cependant, tout en favorisant le maintien de l'humidité des sols, les intercultures utilisent aussi l'eau pour leur propre développement, ce qui peut poser un problème pour la croissance de la culture annuelle, en particulier dans les régions où se posent des problèmes de déficit en eau (Reeves, 1994). La présence d'un couvert sur les sols produit soit augmentation de leur température en hiver (Calkins et Swanson, 1998) soit une diminution de leur température qui peut avoir des effets positifs dans des régions chaudes, ou négatifs dans des régions froides.

Si théoriquement, des solutions techniques existent, elles restent cependant parfois difficiles à mettre en place car elles présentent des contraintes et des charges supplémentaires (surcharge de travail, surcoût...). Elles peuvent par ailleurs d'un point de vue agronomique diminuer l'humidité des sols, augmenter des maladies des végétaux et immobiliser des nutriments (Dabney *et al.* 2001 ; Luna, 1998). Pourtant, pour chaque espèce cultivée, des méthodes, prenant plus ou moins en compte les spécificités du sol, permettent d'éviter des surfertilisations sous réserve que l'objectif de rendement choisi par l'agriculteur soit cohérent avec le potentiel du milieu et l'itinéraire technique mis en œuvre (Le Clech, 1998).

1.2.2.3. Les échelles d'analyse du couvert hivernal des sols

Deux échelles d'analyse spatiales complémentaires sont privilégiées : l'exploitation agricole et le bassin versant. Ainsi que le souligne G. Leynaud (1992), la qualité des eaux se crée au niveau du bassin versant, et est notamment déterminée par le mode d'occupation et d'usage du territoire qu'il définit. Ainsi, dans le cadre d'une approche fonctionnelle du bassin versant vis-à-vis de transferts de flux, le rôle de la couverture hivernale des sols doit être précisé à ces deux échelles.

- **le bassin versant :**

Jusqu'à ces dernières années, le problème de la qualité de l'eau a été abordé à l'échelle des hydrosystèmes à travers une prise en compte des apports globaux des bassins versants : L'utilisation des sols était le plus souvent estimée globalement en pourcentage de surfaces occupées par des grandes catégories ou dans le meilleur des cas elle était considérée à travers l'addition de surfaces de parcelles considérées isolément (Launay et Hubert-Moy, 1997). La plupart des recherches relatives à la relation occupation du sol–qualité de l'eau portent d'ailleurs sur de grands bassins versants, de plusieurs centaines, voire de milliers de km², et mettent en général en évidence que ce sont les conversions des grands types d'occupation et d'utilisation des sols (Régression des espaces forestiers, extension des surfaces urbanisées) qui génèrent une augmentation de la pollution, souvent d'ailleurs par des phénomènes d'érosion et de ruissellement de surface (Cosandey *et al.*, 2002 ; Meybeck *et al.*, 1998). Or, dans les bassins versants d'ordre inférieurs situés en contexte agricole intensif, les conversions des modes d'occupation du sol interviennent aujourd'hui à la marge, l'essentiel des changements qui ont un impact sur la qualité de l'eau se produisant au niveau de l'allocation de l'usage des terres agricoles et de l'aménagement des structures paysagères comme le réseau bocager ou les zones humides. De nombreuses recherches ont ainsi récemment mis en évidence le rôle tampon de ces structures paysagères et des usages des parcelles agricoles vis-à-vis des flux polluants dans des petits bassins versants agricoles à travers la compréhension des mécanismes qui les régissent (Beven et Kirkby, 1979 ; Bruneau *et al.*, 1995 ; Cros-Cayot, 1996).

Dans les systèmes agricoles intensifs, le bassin versant peut être vu comme un ensemble de composantes structurelles « permanentes » (géologie, morphologie de surface, hydrologie, pédologie) ou plus ou moins pérennes, c'est-à-dire dont les variations s'observent à un pas de temps décennal (réseau bocager, zones humides, grandes catégories d'occupation du sols telles que « surfaces boisées » ou « surfaces bâties ») et de composantes « temporaires » qui relèvent de l'utilisation des terres à l'échelle parcellaire ou d'îlots de parcelles en fonction des itinéraires techniques pratiqués par l'agriculteur, dont l'analyse à un pas de temps plus large à l'échelle de l'exploitation agricole permet de définir les systèmes de cultures. L'ensemble de ces composantes ainsi que la géométrie du bassin versant régissent

les flux qui le traversent : leur production, leur temps de transfert et de résidence (Mérot *et al.*, 2003). Elles évoluent à des pas de temps et à des échelles qui leur sont propres, et leur combinaison permet d'établir la « signature fonctionnelle » d'un bassin versant. Ainsi chaque bassin versant, en fonction de ses caractéristiques pérennes et des variations de ses caractéristiques paysagères et d'utilisation des sols, produira dans un contexte climatique donné une réponse spécifique en terme de flux.

L'utilisation des terres au sein d'un bassin versant est fonction de ses caractéristiques permanentes, mais aussi de son histoire, de son ou ses orientations agricoles. Ainsi, chaque bassin versant a un mode de répartition particulier des usages des terres qui influence les risques de pollution (Hubert-Moy, 1998). Ainsi, selon la présence et de la position de parcelles ou d'îlots de parcelles à risque tels que les sols nus en hiver sur le versant et de leur fréquence d'occurrence, le bassin versant va présenter un niveau de risque par rapport aux transferts de flux.

- **L'exploitation agricole :**

A cette échelle, les relations entre les sources de polluants doivent être pensées à la fois au niveau du bassin versant et des exploitations agricoles (Baudry *et al.*, 2004). Ce sont les agriculteurs qui raisonnent l'utilisation de leurs parcelles au sein du territoire de leurs exploitations. Ils affectent un usage à leurs terres en fonction des conditions physiques du milieu (pédologie, pente...), mais aussi en fonction de l'organisation de leur travail (Distance au siège d'exploitation, taille des parcelles, éclatement du parcellaire des exploitations, accès aux parcelles, successions agronomiques nécessaires...) et de la conjoncture économique (prix des marchés, aides et subventions diverses...). Les structures paysagères influent également sur l'utilisation des parcelles : par exemple, les prairies sont davantage associées à des bordures boisées que les cultures (Thenail *et al.*, 2004). En conséquence, les marges de manœuvre des exploitants agricoles qui sont à prendre en compte dans les programmes d'action visant à améliorer la qualité de l'eau, donne l'amplitude des changements potentiels d'utilisation des sols au sein du bassin versant.

D'ailleurs, les actions préconisées dans le cadre de programmes d'actions relèvent-elles à la fois de décisions collectives et de décisions individuelles prises à l'échelle de l'exploitation et du bassin versant tout entier, chacune de ces actions ayant pour objectif soit de réduire les pertes d'engrais et d'effluents, et de pesticides à l'échelle parcellaire ou de constituer des freins au transfert de ces polluants vers le réseau hydrographique

Ainsi, la prise en compte de la dimension spatio-temporelle de la couverture hivernale des sols sur l'ensemble d'un bassin versant est-elle nécessaire pour comprendre les processus

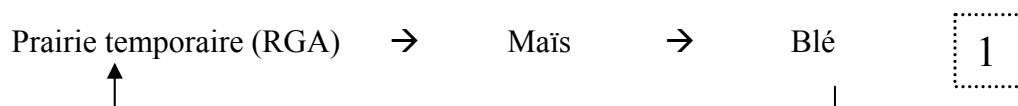
de transferts de flux au sein du bassin versant, mais aussi pour entreprendre des actions en vue d'améliorer la qualité de l'eau (Hubert-Moy et Gascuel-Odoux, 2001).

1.2.3. Une classe d'occupation du sol aux limites floues

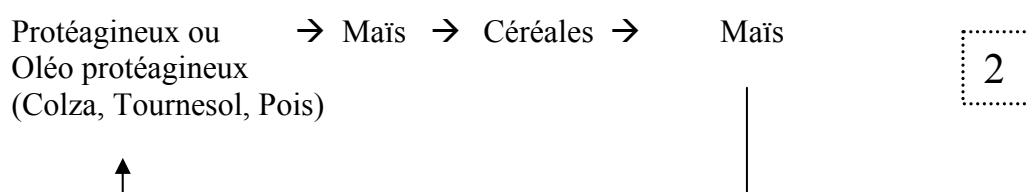
1.2.3.1. La couverture hivernale des sols : un état de transition de l'utilisation du sol

La couverture hivernale des sols correspond à une période transitoire de l'utilisation du sol et plus précisément à une période d'intercultures, elle dépend ainsi très fortement des systèmes de production agricoles. En Bretagne, plusieurs systèmes de production peuvent être identifiés et rattachés à des rotations « type » ; Parmi ceux-ci, deux systèmes de production dominants peuvent être cités :

- les systèmes de production « laitier » où l'on retrouve des cycles de rotation intégrant des céréales et des prairies de type temporaire (les surfaces non accessibles par le cheptel sont généralement exclusivement réservées à la culture) :



- Les systèmes de production hors sol (porcs, volailles) intègrent des rotations avec des successions plus complexes comprenant des protéagineux et une part importante de maïs grain :



A partir de ces modes de productions différents, un calendrier agricole représentant les différents types de couverture hivernale peut être réalisé en fonction des successions culturales « types » (Tableaux 4 et 5):

Chapitre 1. Suivi et prédiction de la couverture hivernale des sols en Bretagne

Mois	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.
Année 1	Croissance du RGA (pâturage+ fauchage...)						Semis Maïs		Croissance du maïs			Récolte maïs	
Année 2	Récolte maïs	Semis céréales	Croissance des céréales							Récolte céréales	Semis RGA	Croissance du RGA	
Année 3	Croissance du RGA (pâturage+ fauchage...)						Semis Maïs		Croissance du maïs			Récolte maïs + semis RGA	

Tableau 4- Calendrier agricole pour une succession culturale type des systèmes de production laitier sur trois années [1]

Mois	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.	Oct.
Année 1	Semis Colza	Croissance du colza								Récolte colza	Sol nu à peu couvert		
Année 2	Sol nu à peu couvert ou interculture						Semis maïs		Croissance du maïs			Récolte maïs	
Année 3	Récolte maïs	Semis céréales	Croissance des céréales							Récolte céréales	Sol nu à peu couvert		
Année 4	Sol nu à peu couvert ou interculture						Semis maïs		Croissance du maïs			Récolte maïs + semis colza	

Tableau 5- Calendrier agricole pour une succession culturale type des systèmes de production hors-sol sur quatre années [2]

Ces calendriers agricoles réalisés pour deux types de successions culturales types des deux grands systèmes de production agricoles bretons illustrent la diversité des types de couverture hivernale présents sur les parcelles en hiver. La durée de l'interculture est, on le voit, très inégale et conditionne les possibilités d'action correctrices, notamment l'implantation de CIPAN. A titre d'exemple, on peut distinguer différents types d'intercultures qui, selon leur durée, offrent des marges de manœuvre plus ou moins longues (Comifer, 2002) :

- Interculture très courte (inférieure à 20 jours) : [maïs grain (récolte en fin octobre) – blé d'hiver (semis en début novembre)]; la marge de manœuvre est extrêmement faible.
- Interculture courte (de 20 à 60 jours) : [blé d'hiver – blé d'hiver] ; du fait du semis d'une culture en automne, la marge de manœuvre est là aussi assez faible.

- Interculture longue (de 120 et 150 jours) : [maïs grain – légumineuse de printemps (avril)]. Même si le laps de temps permet l'implantation d'une culture intermédiaire, sa mise en place est rendue difficile compte tenu de la récolte tardive
- Interculture très longue (de 200 à 240 jours) : [céréales – maïs]. Les possibilités d'actions sont ici très nombreuses

Les possibilités d'action correctrices d'implantation d'un couvert hivernal apparaissent donc importantes pour les systèmes de production de type hors-sol mais le risque de lessivage de l'azote s'avère élevé si aucune culture intermédiaire n'est implantée (la parcelle se retrouve en effet en sol nu à peu couvert tout l'hiver). Pour les systèmes de production laitiers, la gestion des rotations culturales fait qu'en automne, les parcelles recueillent généralement une prairie temporaire ou une céréale. Celles-ci n'offrent cependant pas une couverture complète des sols avant la fin de l'hiver et sur ces parcelles les mécanismes de lessivage d'azote peuvent également être importants (notamment les transferts d'eau en profondeur pendant les phases de faible transpiration du couvert en hiver).

1.2.3.2. La couverture hivernale des sols : un caractère incertain et imprécis

Deux critères rendent l'identification et *a fortiori* le suivi de la couverture hivernale des sols incertains :

-La nature du couvert :

La couverture hivernale des sols en Bretagne, de par son caractère transitoire dans l'utilisation des sols pour différents systèmes d'exploitation, apparaît stratégique dans la lutte des pollutions d'origine agricoles. Cependant, sa nature reste très variée, car tributaire des rotations culturales, des systèmes de production agricoles, des contraintes physiques (climat, pédologie,...), des contraintes environnementales... A ce titre, la Directive Nitrate offre une belle illustration puisque dans les zones d'action complémentaires définies dans le cadre de cette mesure environnementale, les agriculteurs sont dans l'obligation d'implanter des couverts végétaux pour couvrir la totalité de la Surface Agricole Utile pendant l'automne et l'hiver. Les couverts végétaux proposés sont les suivants :

- une prairie ou l'implantation d'une culture d'automne (colza, blé ...) ;

- l'installation d'une culture intermédiaire «piège à nitrates » (CIPAN), pour une durée minimale (du 15 septembre au 1er février après céréales et cultures d'été ; du 1er novembre au 1er février après maïs)
- la repousse de la culture précédente (colza, céréales) dès lors qu'elle peut atteindre un développement végétatif suffisant couvrant le sol de manière régulière.
- des résidus de culture peuvent être laissés sur place, sans travail du sol, pour constituer un mulch après une culture de maïs grain ou certaines cultures légumières, récoltées après le 31 octobre et non suivies d'une culture d'hiver,.

-La variété d'états de surface du couvert végétal

La simple identification du couvert hivernal est parfois rendu complexe de par la grande variété d'états de surfaces et de types de couverts après les cultures principales : Repousses après céréales, sols nus labourés, sols nus avec chaumes de céréales, implantation d'intercultures, semis de céréales ou de prairies de longue durée. De plus, plusieurs types d'intercultures sont rencontrés, tels que la phacélie, le colza, la moutarde, le ray-grass anglais... leur gestion et implantation dépendant de multiples critères tels que la conjuncture économique (primes, programmes d'action...), le comportement individuel de l'exploitant, le cycle des rotations culturales,... De surcroît, elles peuvent être implantées en inter-rangs avec des céréales. Enfin, pour un même type de couvert végétal, l'apparence de la parcelle varie sensiblement avec son taux de recouvrement, qui est fonction de la date des interventions des agriculteurs – implantation du couvert, labour ou désherbage des parcelles – par exemple (Figure 9), et du contexte météorologique, un excès ou un déficit pluviométrique peut entraîner un retard dans l'implantation ou le développement des cultures.

Plusieurs types d'intercultures...Exemples :



Des pratiques diverses...Exemples :



Différentes densités de couverts... Exemples :



Figure 9- Une grande variété des états de surface de la couverture hivernale des sols (Bassin versant du Yar, janvier 2003)

L'identification des jeunes couverts hivernaux pose particulièrement problème. Ainsi, même sur le terrain, il est parfois difficile de différencier une jeune prairie d'une jeune céréale. En conséquence, plusieurs analyses peuvent être menées selon l'objectif recherché : On peut ainsi discriminer globalement une classe de sols nus par rapport à des classes de cultures pour réaliser des inventaires de l'occupation et de l'utilisation des sols. Si l'objectif est de mettre en relation la couverture des sols avec une problématique de type transferts de

flux et de matières afin d'élaborer des indices de risques, il convient alors d'identifier précisément les sols sans couverture végétale.

Enfin, l'identification doit permettre de reconnaître les types d'intercultures implantés si l'objectif est d'évaluer des actions environnementales.

Ces différents niveaux d'identification et de suivi posent un certain nombre de problèmes méthodologiques liés au niveau de précision et de qualité des images satellites. Par ailleurs, ce genre de suivi adapté à la couverture hivernale des sols est relativement peu étudié à l'échelle internationale, les méthodes de traitement restent donc à développer pour certains types d'identification.

La couverture hivernale des sols correspond donc à une classe d'occupation/d'utilisation du sol aux limites floues. D'un point de vue temporel tout d'abord, il s'inscrit dans une période de transition de l'utilisation du sol par un exploitant agricole qui, selon de multiples critères, peut s'avérer être plus ou moins longue. Associé à cet état temporel incertain, l'identification et le suivi du couvert sont rendus parfois difficile de par une grande variété des états de surface et des types de couverts après les cultures principales. L'aspect incertain et imprécis qui caractérise la nature même du couvert hivernal tant d'un point de vue spatial que temporel est donc à prendre en compte pour une simulation pertinente de la couverture hivernale de sols.

1.3. Modélisation prédictive de l'occupation des sols

La compréhension des processus qui génèrent des problèmes environnementaux tels que la dégradation de l'eau ont contribué à accroître l'utilisation d'approches modélisatrices, notamment pour simuler les effets des impacts anthropiques sur le milieu. Des outils d'analyse spatiale tels que la télédétection, les systèmes d'information géographique,... contribuent depuis plusieurs années à enrichir les approches de modélisation quantitative, qualitative et systémique déjà existantes. Parmi les différents champs d'application de ces approches, la modélisation de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol occupe une place importante, qui fait depuis plusieurs années l'objet de nombreuses études et recherches. Un rappel conceptuel et théorique de ces approches modélisatrices est effectué avant la présentation des principaux modèles de simulation de l'occupation du sol illustrés par quelques exemples d'application, ce qui permettra d'orienter le choix d'une approche visant à effectuer une modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols.

1.3.1. Rappels sur l'approche conceptuelle de la modélisation

1.3.1.1. La modélisation en géographie

L'approche modélisatrice, avec le développement des technologies informatiques, constitue aujourd'hui un mode d'analyse privilégié en géographie. Ce type d'approche n'est pas nouveau, puisque dès la fin du 19^{ème} siècle, Weber et Von Thünen l'utilisent dans leurs travaux. Cette démarche s'inscrit alors dans l'émergence d'un nouveau paradigme géographique qui se développe à partir des années 1930 : l'analyse spatiale. A l'origine, en réaction contre la pratiques traditionnelles de la géographie, préoccupée d'illustrer et d'expliquer l'unicité de chaque lieu, l'analyse spatiale s'est posée comme une approche nomothétique orientée par la recherche de modèles et de lois générales. « L'analyse spatiale est l'étude formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace produit et vécu par les sociétés humaines » (Chamussy *et al.*, 1998) ; elle se consacre à la localisation et à l'étude d'un phénomène dans l'espace à des fins de description, d'explication ou de modélisation. La démarche est ici hypothético-déductive, elle consiste à interroger le réel à partir d'hypothèses en utilisant des théories et des modèles spatiaux explicitement énoncés. Ces derniers sont confrontés à la réalité géographique en pratiquant des simulations. L'objectif de cette approche est d'identifier des régularités et des principes d'explication, énoncés grâce à des concepts spatiaux, qui se répètent sur de multiples portions d'espace terrestre. Il se réalise par une confrontation permanente entre propositions générales et situations particulières.

Deux niveaux d'analyse sont généralement utilisés dans les études portant sur la modélisation de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols :

- Un niveau « micro-échelle » où les comportements individuels sont étudiés et mis en relation avec les changements d'occupation du sol. Les approches socio-économiques et psychologiques sont dans ce cas privilégiées. D'un point de vue spatial, les territoires concernés par ces analyses sont de tailles relativement réduites et font appel à des techniques d'analyse de type quantitatif et qualitatif.

- Un niveau « macro-échelle » où les changements d'occupation du sol sont examinés d'un point de vue géographique et biophysique afin d'identifier les dynamiques spatiales qui motivent ces changements. Dans ce cas, les territoires étudiés sont beaucoup plus vastes, pouvant atteindre l'échelle continentale avec l'aide des outils de télédétection.

Les modèles de simulation de l'occupation du sol s'inscrivent dans la famille des modèles dynamiques. Ce sont donc des outils et techniques d'analyse spatiale qui permettent *a priori* d'étudier les causes et les conséquences de l'évolution de l'occupation du sol dans le but d'une meilleure compréhension de cette dernière. Ce type de modèle doit donc permettre de prendre en compte un ensemble complexe de paramètres socio-économiques et biophysiques qui influencent le rythme et la nature des changements de l'occupation du sol afin de pouvoir simuler spatialement ces changements et leurs conséquences sur l'environnement.

Un certain nombre de caractéristiques telle que l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols doivent être considérées avant la mise en place d'un processus de modélisation d'un phénomène. On peut ainsi retenir six paramètres principaux (Verburg, 2002).

- Les dynamiques entre les différentes échelles d'analyse

L'occupation du sol étant le résultat de processus multiples qui agissent à différentes échelles, il est nécessaire de confronter les différentes échelles d'analyse afin de déterminer les interactions existantes entre ces niveaux d'analyse. Cependant, la confrontation de processus se produisant à différentes échelles est délicate de par la complexité des processus, considérés et la plupart des modèles se basent sur une seule échelle d'analyse (Gibson et al. 2000)

- Les facteurs de changements

Les changements d'occupation du sol sont souvent modélisés en fonction d'une sélection de variables socio-économiques et biophysiques que l'on nomme « facteurs de changements » (Turner et al., 1993). Ces variables sont multiples, elles peuvent ainsi correspondre à des contraintes climatiques, à la qualité des sols, aux programmes environnementaux agissant sur le site d'étude, à la conjoncture politique, économique,...

Ainsi, il est impossible de prendre en compte la totalité des facteurs qui motivent les changements d'occupation et d'utilisation des sols.

- Le choix des facteurs de changements d'occupation et d'utilisation du sol

Les facteurs de changement agissent à des niveaux d'analyse spatiale et temporelle différents et leur sélection est ainsi très dépendante du niveau de simplification du modèle. Plus le modèle de simulation est complexe, plus le nombre de facteurs de changements à prendre en compte est important. Des approches ont été développées afin de déterminer les facteurs de changement prépondérants dans les changements d'occupation du sol, à partir de l'analyse des relations entre les changements d'occupation du sol et les facteurs de changements identifiés. Trois approches peuvent être distinguées (Verburg *et al.*, 2002) : la première se base sur les relations établies entre les changements d'occupation du sol et les facteurs de changements impliqués. Les modèles économiques utilisent souvent cette approche basée sur l'analyse des « input-output » afin d'en déterminer des lois générales (Fisher et Sun, 2001). La seconde approche utilise des méthodes empiriques qui quantifient les relations entre les facteurs de changements et l'occupation du sol via des techniques statistiques (Pontius *et al.*, 2001 ; Mertens et Lambin, 1997). La troisième méthode consiste à faire appel à la « connaissance expert », cette méthode est fréquemment utilisée pour les modèles de type automate cellulaire (Cecchini, 1996), où la complexité même du modèle favorise plutôt l'approche qualitative exprimée à dire d'experts.

- Interaction spatiale et effets de voisinage

L'occupation du sol d'un territoire est généralement caractérisée par une autocorrélation spatiale qui s'explique entre autres, par une distribution fragmentée du paysage jouant un rôle déterminant dans l'usage des sols. Ainsi, dans les paysages agricoles, l'adoption massive d'un type de système de culture peut avoir des répercussions visibles sur l'utilisation des sols. L'importance de telles dépendances spatiales en relation avec son environnement (économique, physique, structurel,...) est largement reconnu par les géographes et économistes et des analyses de type géostatistiques sont ainsi menées pour tenter de les quantifier. Le niveau d'autocorrélation spatiale est dépendant de l'échelle d'analyse et différents types de connectivité entre les unités spatiales peuvent être distingués :

- une connectivité où interviennent des réseaux physiques de type routes, corridors écologiques, lignes de communication... qui structurent spatialement la circulation des personnes, des biens, de l'énergie, des animaux,... Ces flux peuvent être associés à des fonctions générant des formes statiques de l'utilisation du sol ;
- une connectivité liée à l'aspect réglementaire d'un espace où l'utilisation des sols dépend des règles environnementales, économiques,... en vigueur.

L'analyse des types de connexions qui structurent les auto-correlations spatiales est importante dans la compréhension de l'occupation et de l'utilisation du sol d'un territoire.

- Les dynamiques temporelles définissant des trajectoires de changement

Les changements d'occupation du sol ne se limitent pas à leur expression spatiale, ils s'inscrivent également dans une dimension temporelle qu'il faut prendre en compte. Les changements d'occupation du sol ne peuvent en effet pas être expliqués simplement par la présence de facteurs de changements à un instant précis. Ces changements sont souvent dépendants de conditions initiales passées et parfois d'événements aléatoires qui rendent leur appréhension difficile. On remarque ainsi que les changements sont rarement linéaires et des seuils liés à des événements aléatoires peuvent avoir un impact important. Deux échelles sont généralement prises en compte : l'échelle longue qui s'appuie sur un suivi historique important. A cette échelle, les modèles de simulation sont généralement orientés vers des simulations prospectives à moyen et long terme. *A contrario*, un suivi court de l'évolution de l'occupation du sol, de l'ordre de quelques années, permet d'effectuer une modélisation prédictive à court terme d'un phénomène.

- Les niveaux d'intégration et de validation du modèle

L'occupation du sol est composée d'entités spatiales interdépendantes qui interagissent entre elles par des relations complexes jouant à différentes échelles d'analyse, rendant l'identification, le choix et la hiérarchisation des facteurs de changement très difficiles. Par ailleurs, la prise en compte de son évolution rend ces interactions complexes et il est souvent ardu de distinguer la cause de l'effet, l'échelle temporelle significative, d'un décalage dans le temps, des discontinuités, des effets de seuils et des limites (Costanza et Wainger, 1993). Cette complexité fait de l'intégration de tous ces paramètres, que l'on pourrait qualifier de sous-systèmes, un problème crucial en modélisation de l'occupation du sol. Deux niveaux d'intégration peuvent être pris en compte : le premier implique d'analyser séparément les différents sous-systèmes en supposant que les interactions entre ces derniers sont négligeables. Le deuxième niveau correspond à une vue holistique, les interactions entre les sous-systèmes sont ici privilégiées et analysées de façon conjointe. L'approche utilisée dépend fortement de l'échelle temporelle et de l'objectif à atteindre, un compromis approprié entre ces deux niveaux d'intégration doit être trouvé : une trop grande complexité d'un modèle le rend difficilement opérationnel et reproductible ; à l'inverse une simplification à outrance le rend peu fiable, voire inutile.

La validation d'un modèle de simulation de l'évolution de l'occupation du sol est généralement basée sur la comparaison entre les résultats du modèle avec l'état observé à un instant précis. Un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique apparaissent alors. Il faut en effet que la comparaison soit fiable, c'est-à-dire que la date de référence qui sert de validation corresponde au même contenu informatif que le résultat issu de la simulation. Cela

implique le même processus de classification si l'on utilise une donnée de télédétection, une résolution spatiale identique,... Différents niveaux de validation interviennent : le premier prend en compte l'aspect quantitatif du taux de réussite de la validation. Le deuxième est qualitatif, il valide spatialement la simulation avec le terrain, c'est-à-dire l'allocation spatiale des changements d'occupation du sol.

1.3.1.2. Les différentes approches modélisatrices

D'une façon générale, on peut distinguer les approches non approximatives ou « dures » des approches « approximatives » ou incertaines (Parra, 1997).

- Les approches non approximatives

Plusieurs approches de modélisation prédictive, que l'on peut qualifier de « non approximatives » par opposition aux méthodes dites approximatives, et présentant différents modes d'exploitation et de représentation des connaissances, ont été développées et appliquées dans le domaine environnemental (Parra, 1997). Elles reposent sur des principes mathématiques très différents.

- L'approche empirique :

Déduite des tendances observées à l'intérieur d'un ensemble de données, l'approche empirique part du postulat que ces tendances ne vont pas changer dans le temps. Les représentations logiques structurent certaines de ces approches empiriques. En logique, « toute connaissance est représentée par une formule construite selon une syntaxe précise ; une base de connaissance est alors constituée exclusivement d'un ensemble de formules décrivant l'univers du discours ». Trois types de raisonnements logiques peuvent être distingués (Haton *et al.*, 1991) :

→ Le raisonnement déductif, qui permet à partir de connaissances sur un phénomène quelconque de déduire des conclusions.

→ Le raisonnement inductif au contraire part des conclusions pour déterminer les prémisses de règle.

→ Le raisonnement abductif qui cherche à attacher des causes plausibles à un ensemble de prémisses.

- L'approche mécaniste :

Elle est basée sur la connaissance du fonctionnement d'un système. Les différents processus qui composent le système sont modélisés indépendamment à l'aide de formules qui décrivent une loi ou une règle (Bracker, 1996). Les modèles basés sur des règles de production relèvent de cette approche. Ils comprennent trois parties :

→ Une base de fait, mémoire de travail qui contient les données initiales décrivant le problème à traiter puis les hypothèses émises définissant ainsi le cadre de travail dans lequel on s'inscrit,

→ Une base de règles constituant la connaissance permanente,

→ Un moteur d'inférence, mécanisme ou algorithme qui exploitent les règles. Les moteurs d'inférence peuvent fonctionner selon deux mécanismes. Le « chaînage avant » qui part de la base de faits pour aboutir à des conclusions, de la forme : si conditions (Y) alors conclusion prédictive (X). Le chaînage arrière qui prend la procédure dans le sens inverse, part des conclusions pour arriver à des conditions initiales. On peut également trouver des cas où les deux mécanismes sont combinés.

Ce genre d'approche se prête bien à la modélisation de processus complexes qui requièrent l'expertise de professionnels. Le savoir-faire de ces derniers aide à l'élaboration de procédures, de méthodes permettant de mettre en place des bases de règles pour la modélisation des processus. Ces modèles sont en revanche peu appropriés pour décrire dans la totalité une base de fait quand celle-ci est importante et que les bases de règles à mettre en œuvre ne prennent donc pas en compte l'ensemble des paramètres pour la modélisation du phénomène. Cette approche, bien adaptée aux applications de type industrielles, ne souffre pas d'approximation ou d'incertitude dans la base de données.

- L'approche systémique :

L'approche systémique comprend des modèles de description mathématique de plusieurs processus simultanés et de leurs interactions. Ces modèles soulignent l'importance de ces interactions et considèrent plusieurs processus comme un seul système. C'est le cas des réseaux sémantiques, comme les réseaux de neurones. Ils sont souvent représentés par des graphes étiquetés dans lequel les nœuds figurent des objets ou des concepts et les arcs étiquetés souvent des relations entre concepts. Ils constituent ainsi un moyen de structuration des bases de connaissances et des faits, aspect particulièrement important quand elles sont de grande taille. C'est également le cas des modèles de simulation dynamique d'écosystèmes qui s'intéressent à décrire le plus fidèlement les composantes qui font partie du système. L'objectif de ce type de modèle est de prendre en compte l'ensemble des variables clés et leurs interactions. L'élargissement de ces modèles aboutit aux modèles de simulation dynamique spatiale qui prennent dans leurs processus de modélisation en compte les différentes configurations spatiales de la surface du sol et les actions possibles que l'homme peut effectuer pour modifier l'utilisation du sol (Dale, 1993). La principale limite de ces modèles est qu'ils sont très liés aux spécificités géographiques des sites sur lesquels ils s'appliquent et demeurent donc difficilement transposables à d'autres espaces.

-Les approches « approximatives »

Dans le cadre des modes de raisonnement évoqués plus haut, un résultat issu d'une procédure modélisatrice est soit fausse ou vraie ou binaire. Cependant, le raisonnement et la mise en place de modèles reposent souvent sur des connaissances et des bases de données imparfaites ou imprécises. La mise en place de procédures visant à établir des scénarii prédictifs les plus fiables possibles doit donc prendre l'incertitude et/ou l'imprécision dans les bases de données. Concevoir de telles procédures implique de sortir des approches classiques de la logique mathématique, cela exige de définir une représentation de l'incertitude et de l'imprécision, de choisir des procédures de raisonnement qui prennent en compte ces aspects tout en les propageant au cours des étapes de raisonnement afin de pouvoir les qualifier et les quantifier dans les résultats. De nombreux travaux ont ainsi été effectués sur les mesures de l'incertitude (Burrough, 1986 ; Lee *et al.*, 1987 ; Maling, 1989 ; Stoms, 1987) sur l'estimation de l'erreur (Congalton, 1991) et la propagation de l'erreur (Burrough, 1986).

Dans le langage courant, les termes exprimant le raisonnement approximatif sont variés (à peu près, environ, approximativement...). Seuls quelques-uns sont liés à des théories mathématiques :

→ Le qualificatif « *incertain* » s'applique à des éléments de connaissance dont la valeur de vérité est connue avec plus ou moins de précision (Haton, 1991).

Exemple : Si l'on trouve du maïs sur cette parcelle, alors il y a présomption de trouver du blé l'année suivante (si l'on a du maïs, alors l'hypothèse énoncée est vraisemblable.)

→ Le terme « *imprécis* » s'applique à des éléments de connaissance dont le contenu n'est pas connu parfaitement.

Exemple 1 : la parcelle mesure entre 2 et 3 hectares (la taille de la parcelle appartient à l'intervalle [2 ; 3], l'imprécis est ici non flou.

Exemple 2 : les rendements seront environ de 80 quintaux à l'hectare (les rendements se situent autour de 80 q/ha de façon imprécise floue).

Exemple 3 : les rendements seront probablement assez importants cette année. (On trouve ici la notion d'incertitude avec probablement et le concept d'imprécision avec le qualificatif assez et le prédicat important).

Le concept d'incertitude est donc en rapport avec le degré de confiance que l'on affecte à des faits ou un phénomène alors que l'imprécis est directement lié à l'attribut lui-même et à sa valeur. Malgré ces difficultés, des systèmes experts peuvent élaborer à partir de connaissances imprécises ou incomplètes des modèles pertinents fournissant des résultats exploitables. Les techniques de raisonnement approximatif tentent d'automatiser cette démarche.

La théorie des ensembles flous proposée par Zadeh en 1965 constitue dans ce sens une approche « approximative » intéressante. Elle privilégie les procédures dominées par des décisions « douces » au dépend des procédures utilisant des décisions « dures » (Figure 10). Contrairement à la logique binaire où les données sont classées dans des catégories bien précises (par exemple, telle parcelle est classée dans la catégorie prairie permanente), dans la théorie des ensembles flous les données sont exprimées en terme d'appartenance à une valeur : elle prend donc en compte l'imprécision. Cette valeur est comprise entre 0 et 1 indiquant une progression constante de la non-appartenance d'une valeur à une classe à son appartenance total. Par exemple, si l'on veut attribuer sur un modèle numérique de terrain la classe pente forte, sachant qu'elle se trouve entre 15 et 20%, la technique utilisant les décisions « dures » placerait la limite à 17.5%. L'utilisation de la théorie des ensembles flous définirait une valeur 0 à 10% jusqu'à 1.0 pour la valeur 25%. Ainsi, entre 10 et 25%, l'appartenance à la pente forte augmente graduellement pour atteindre son maximum à 25%

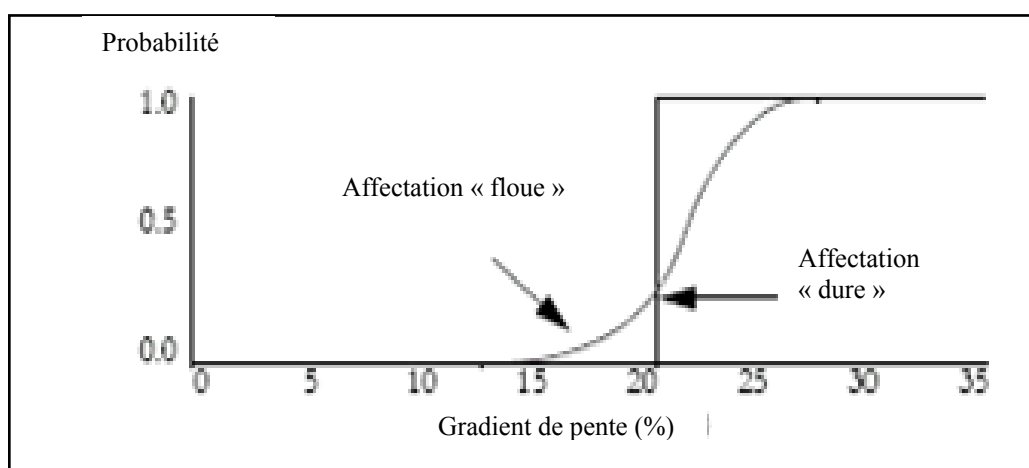


Figure 10- Prise de décision avec une fonction floue (d'après Eastman, 2003)

L'avantage de la théorie des ensembles flous est qu'elle permet d'outrepasser des problèmes d'appartenance à une classe spécifique pour une information quelconque. Cependant, elle n'exprime qu'une ambiguïté dans l'appartenance à un ensemble, en aucun cas, elle ne permet de résoudre le problème de l'incertitude qui n'est ni évaluée ni qualifiée à une fonction d'appartenance.

1.3.2. Les modèles de simulation de l'évolution de l'occupation du sol

De multiples modèles ont été développés pour produire des simulations de l'évolution de l'utilisation des sols (Briassoulis, 1999 ; Agarwal *et al.*, 2000 ; Veldkamp et Lambin, 2001). Parker *et al.* (2003), dans une synthèse non exhaustive, distinguent sept grandes catégories de modèles, qui se recoupent pour partie : les modèles mathématiques basés sur

une ou plusieurs équations qui recherchent une solution d'équilibre (Sklar et Costanza, 1991 ; Chuvieco, (1993) ; les modèles systémiques (Gilbert et Troitzsch, 1999) ; ceux fondés sur des techniques statistiques telles que des régressions (Ludeke *et al.*, 1990 ; Mertens et Lambin, 1997) ; les modèles experts (Eastman, 1999); les modèles d'évolution, reposant sur les réseaux neuronaux (Balling *et al.*, 1999) ; les modèles cellulaires qui comprennent les automates cellulaires (Tobler, 1979 ; Alcamo, 1994) et les champs de Markov (Li et Reynolds, 1997) ; Les modèles multi-agents (Woolridge, 1999). Enfin, certains modèles sont dits hybrides car ils combinent deux ou plusieurs de ces catégories de modèles. Un des plus connus est le modèle CLUE qui combine des techniques statistiques avec des modèles cellulaires (Velkamp et Fresco, 1996).

Ces différents modèles peuvent être à leur tour classés en fonction de leur approche d'analyse :

-l'approche non approximative comprend les modèles d'approche « dure », de type empirique, mécaniste et systémique.

-l'approche approximative comprend les modèles intégrant le flou, l'imprécision et l'incertain dans leur processus de modélisation.

1.3.2.1. Les modèles reposant sur une approche « dure »

- Les modèles mathématiques

Ils sont basés sur une ou plusieurs équations qui recherchent une solution d'équilibre (Sklar et Costanza, 1991 ; Chuvieco, 1993). Ils reposent sur l'élaboration d'une ou plusieurs équations mathématique pour simuler un phénomène étudié, pour modéliser le niveau de complexité des changements d'occupation du sol, ces modèles sont généralement combinés avec d'autres techniques modélisatrices. Citons ici l'exemple d'un modèles de fonction logistique réalisé pour modéliser un processus de déforestation (Lambin, 1994).

.Faisant partie de la famille des modèles empiriques, ils s'appuient sur la formule suivante :

$$\frac{dD}{dt} = rD \left[\frac{F - D}{F} \right]$$

Avec : dD qui représente la croissance de la déforestation à travers le temps

F qui exprime le niveau de mesure de déforestation en fonction de sa densité D et de son taux de croissance r .

- Les modèles statistiques

Ils sont communément utilisés en modélisation de l'évolution de l'occupation du sol (Ludeke *et al.*, 1990 ; Mertens et Lambin, 1997).. Ils tentent d'identifier explicitement les causes des changements de couverture végétale des sols en utilisant par exemple des analyses multivariées des contributions exogènes possibles (critère physique, économique,...) afin de dériver de manière empirique le rythme et le niveau du changement. Parmi les techniques utilisées, citons les régressions logistiques multiples souvent appliquées avec succès pour les études de déforestation, de prédiction des feux de forêt (Vega Garcia *et al.*, 1995). Une des difficultés des modèles statistiques pour la simulation de l'occupation du sol tient à leur incapacité de gérer la variabilité spatiale dans le processus de changement d'occupation du sol (Serneels et Lambin, 2001). Pour pallier à cette déficience, différents modèles de paramétrage ont été développés pour prendre en compte les différents processus de changement d'occupations qui interagissent sur un même territoire (Lambin, 1994).

- Les modèles d'évolution

Ils reposent sur les réseaux neuronaux (Balling *et al.*, 1999). Un réseau de neurones est « une méthode de calcul inspirée par les études du cerveau humain et des systèmes nerveux. Il se compose d'éléments de traitement interconnectés (neurones) travaillant conjointement pour résoudre un problème spécifique » (Chiari *et al.*, 2002). Les réseaux de neurones sont organisés en couches composées d'un certain nombre de neurones interconnectés qui contiennent une fonction d'activation (Figure 11). Des entrées sont présentées au réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée, qui les communique aux couches cachées où le traitement s'effectue en utilisant des connexions pondérées. Puis, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie. Un des aspects originaux des réseaux de neurones est son approche inductive qui permet de partir des conclusions pour déterminer les prémisses de règle.

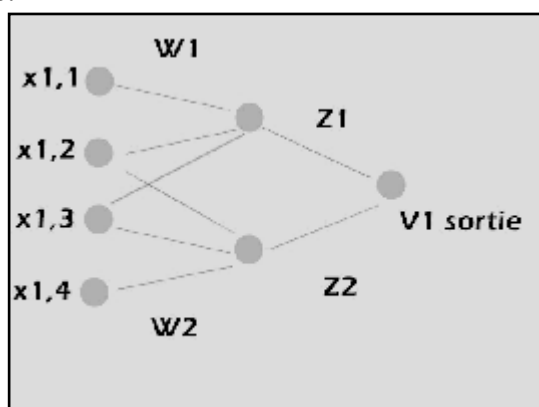


Figure 11- Organisation d'un réseau de neurones (Chiari *et al.*, 2002)

- Les modèles cellulaires

Les automates cellulaires (Tobler, 1979 ; Alcamo, 1994) peuvent être considérés comme des outils informatiques de modélisation de type « individu-centré » pour laquelle on considère l'inscription des comportements des individus au niveau d'entités spatiales élémentaires appelés « cellules ». L'environnement spatial du système est dans ce cas représenté par une grille de cellules dont le modélisateur définit les règles d'évolution selon le principe de l'autocorrélation spatiale et temporelle. L'état d'une cellule (qui peut correspondre par exemple à une parcelle agricole) au temps $T + 1$ dépendra ainsi de l'état de cette cellule et de son voisinage au temps T . La dynamique du système repose ainsi sur les interactions locales entre les entités spatiales voisines. Les automates cellulaires intègrent de ce fait les interactions sociales de manière agrégée au niveau des entités spatiales ce qui implique une homogénéité des comportements individuels et que seules les relations de voisinage entre les cellules sont étudiées de manière interactive. Cette approche qualifiée de « sur-spatialatrice » par Bonnefoy (Bonnefoy, 2003) met en évidence la difficile prise en compte des interactions sociales entre les entités d'un système

- Les modèles multi-agents

Ils sont « constitués d'un ensemble d'agents autonomes et indépendants en interaction, qui coordonnent leurs actions dans un environnement et forment une organisation artificielle (Ferber, 1995). Comme pour les automates cellulaires, les systèmes multi-agents (SMA) relèvent de l'Intelligence Artificielle Distribuée et visent à résoudre un problème ou simuler un événement en le découpant en tâches spécifiques qui sont simultanément traitées par un ensemble de règles de calcul. Les deux grands domaines d'application des SMA sont la résolution de problèmes informatiques et la simulation de systèmes complexes. Appliquée à la modélisation de l'évolution de l'occupation du sol, les SMA se concentrent généralement sur les comportements humains. Ces modèles sont donc souvent combinés avec d'autres types de modèles pour simuler l'évolution de l'occupation du sol (Manson, 2000) afin d'inclure l'aspect spatial dans le processus de modélisation.

1.3.2.2. Les modèles reposant sur une approche « approximative »

- Les champs de Markov (Li et Reynolds, 1997)

La théorie des chaînes de Markov a pour objectif de prendre les décisions optimales dans un monde incertain. Les processus de changement sont ici simulés à l'aide de techniques stochastiques linéaires, c'est-à-dire que la mise en place du modèle est contrôlé par des variables aléatoires qui ne peuvent être exprimées que de façon probabiliste. Les chaînes de Markov étudient ainsi à partir de probabilités, le processus d'évolution d'un ensemble d'états évoluant dans le domaine spatial, temporel ou de la fréquence. Un processus d'évolution est dit markovien si la probabilité d'observation de l'état est tributaire d'un nombre fini de ses voisins, qu'ils soient de type spatial ou temporel. Si l'état constaté à l'instant « T » ne dépend que de l'état précédent, il est identifié alors comme étant un modèle de premier ordre. S'il dépend de plusieurs états antécédents, on parlera dans ce cas d'un modèle markovien d'ordre supérieur (Parra G.A., 1997). Les paramètres d'entrée du modèle sont donc les probabilités de transition entre deux états qui peuvent être analysées statistiquement à partir d'un échantillonnage de données. Les types de changement identifiés entre les états doivent donc être les plus précis possibles pour une estimation correcte des éléments composant la matrice. Des modifications peuvent être apportées aux chaînes de Markov en y intégrant des mesures de probabilités, générant ainsi des chaînes de Markov cachées. Le HMM (Hidden Markov Model) permet alors de représenter deux processus stochastiques, le premier gérant le second (Benoît *et al.*, 1998) :

- le premier processus est calculé par rapport à un ensemble d'états à un pas de temps donné, c'est une chaîne de Markov d'ordre 1 ou 2.
- Le deuxième produit des observations à chaque pas de temps en fonctions du poids des probabilités définies sur chaque état. « On suppose ainsi que l'observation d'une culture une année donnée sur une parcelle suit la loi définie sur l'état atteint cette année par le processus caché ».
- L'avantage principal des chaînes de Markov repose sur la relative simplicité des paramètres qui consistent à la création d'une matrice composée des probabilités de transition d'un état à un autre. La limite majeure de la théorie est que la classe en sortie en sortie du modèle dépend uniquement des antécédents culturels de la parcelle, alors que les facteurs qui motivent le changement sont beaucoup plus complexes et diversifiés.

- Les modèles experts

Ils combinent des dires d'experts avec des techniques de probabilité non fréquentistes (la probabilité est alors vue comme une mesure du degré de confiance que l'on peut avoir vis-à-vis de tout événement incertain) comme les modèles probabilistes bayésiens ou le modèle issu de la théorie des évidences de Dempster-Shafer (Eastman, 1997). Ils comprennent également des modèles qui associent les dires d'expert à des approches d'intelligence

artificielles, tels que les systèmes experts et les systèmes à base de connaissances (Gordon et Shortliffe, 1984 ; Lee *et al.*, 1992). Ces modèles expriment des connaissances qualitatives de façon quantitative, en permettant de déterminer où les changements sont susceptibles de se produire. Le problème principal des modèles experts est qu'ils nécessitent de prendre en compte tous les aspects du problème considéré (Parker *et al.*, 2003), ce qui limite souvent leur usage à des sites de taille réduite. Mais leur intérêt principal est de combiner des informations très hétérogènes incluant des informations qualitatives, ce qui s'avère souvent nécessaire pour simuler de façon vraisemblable l'évolution future de l'utilisation des sols. Ainsi, ils apparaissent bien adaptés pour appréhender le futur de territoires dont l'historique et la situation présente sont bien connus, et pour lesquels de nombreuses sources d'information d'origine diverses peuvent être combinées. D'ailleurs, plutôt que le terme de combinaison, il est préférable dans ce cas de retenir le terme plus précis de fusion d'informations. Une information unique telle que l'historique de l'évolution de l'utilisation des sols étant évidemment trop limitative pour simuler une situation future (cela supposerait que ne peuvent se produire que des changements qui ont déjà eu lieu dans le passé), il faut lui associer des informations complémentaires afin de rejeter ou de confirmer une décision sur l'éventualité d'un changement. La fusion de données a été définie par Bloch et Maître (1994) comme suit : *"la fusion de données est l'utilisation conjointe d'informations hétérogènes pour l'aide à la prise de décision"*. Il existe principalement trois opérateurs de fusion : les modèles probabilistes bayésiens, les modèles flous et le modèle issu de la théorie de l'évidence de Dempster-Shafer. La fusion des informations est réalisée par les modèles probabilistes bayésiens, qui sont les plus répandus, à travers la règle de Bayes. Des recherches ont mis en évidence que les performances de cet opérateur tendent à se dégrader au-delà d'un certain seuil d'information introduit pour la fusion (Peddle, 1993). Mais surtout ces modèles ne discernent pas clairement les deux notions d'incertitude et d'imprécision, ce qui apparaît préjudiciable à une bonne fusion. Une des techniques non probabilistes les plus répandues est celle qui relève de la théorie des ensembles flous (Zadeh, 1965). Cette technique représente de façon généralement explicite des informations sous la forme de fonctions d'appartenance. Elle présente l'inconvénient majeur de représenter surtout le caractère imprécis des informations, l'incertitude étant alors implicite (Bloch et Maître, 1994). *A contrario*, la théorie de l'évidence de Dempster-Shafer, permet de représenter à la fois l'imprécision et l'incertitude à l'aide de fonctions, de plausibilité de crédibilité et de confiance (Srinivasan et Richards, 1990).

1.3.3. Simulation de l'évolution de la couverture hivernale des sols par une approche approximative

1.3.3.1. *Prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision dans le processus de modélisation*

La masse de plus en plus importante d'informations diverses et variées liée, entre autre, au fort développement de l'informatique (et donc des possibilités accrues de traiter et stocker l'information) génère de nouvelles perspectives en géographie. Elle pose également de nouvelles difficultés de gestion et de traçabilité des contenus informationnels qui font l'objet aujourd'hui de nombreuses recherches et débats (organisation des bases de données, mise aux normes internationales des métadonnées, gestion et utilisation des « mémoires environnementales »...). Il est maintenant reconnu que les informations spatialisées (issues de la télédétection, SIG, contrôles terrain,...) sont rarement, voire jamais totalement exactes (Heuvelink et Burrough, 2002). On trouvera toujours des divergences significatives entre la réalité et sa représentation, car la réalité est incorporée dans un type de format de donnée rigide où sont au mieux estimées les propriétés des unités spatiales.

Plusieurs éléments incertains sont à prendre en compte dans une donnée spatialisée : la localisation géographique, la précision de l'attribut, sa cohérence logique. Or ces données spatiales sont de plus en plus intégrées dans les processus de modélisation environnementale. Leur précision informative, leur impact sur les modèles et leurs résultats deviennent ainsi un challenge important et fait l'objet de nombreux travaux de recherche (Agumya et Hunter, 2002 ; Bachmann et Allgöwer, 2002). Les méthodes utilisées pour estimer l'incertitude et sa propagation sont généralement d'ordre statistiques et géostatistiques (Bachmann et Allgöwer, 2002 ; Goovaerts, 2002) et s'appliquent aussi bien à des problèmes de classification d'images satellites qu'à des modélisations complexes d'évolution d'occupation du sol.

Différents niveaux d'analyse sont appliqués et sont présentés de façons schématiques et simplifiées sur la figure 12. Concernant les données d'entrée, plusieurs solutions existent pour estimer l'incertitude. La plus simple consiste à ne prendre en compte que les données les plus fiables possibles afin de minimiser la propagation des erreurs. La deuxième consiste à pondérer chaque donnée d'entrée en fonction de leur fiabilité mesurée au préalable par des modèles statistiques. Le modèle peut être également entaché d'incertitude étroitement liée à son paramétrage. Sa fiabilité dépend donc du modélisateur et de son niveau de complexité. Associée aux caractéristiques propres du modèle, la propagation de l'incertitude des données d'entrée peut aussi être mesurée par diverses simulations d'ordre statistique (Bachmann et Allgöwer, 2002). Enfin, concernant les résultats la mesure de leur incertitude dépend des données d'entrée et du modèle utilisé. Leur estimation devient problématique et ne peut être mesurée qu'avec une confrontation avec la réalité afin d'estimer leur vraisemblance.

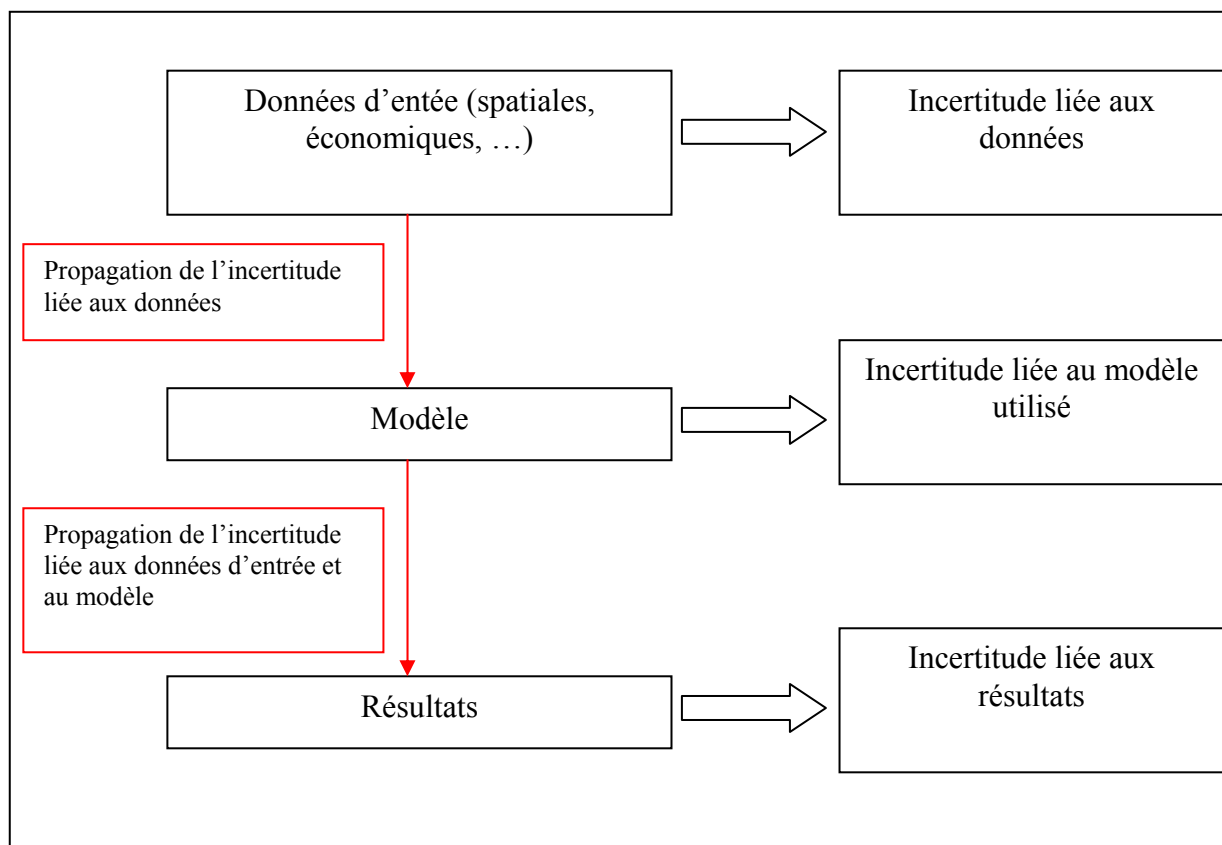


Figure 12- Prise en compte de l'incertitude dans un processus de modélisation d'un phénomène

Mesurer l'incertitude et surtout ses conséquences dans un processus de modélisation requiert des méthodes d'analyse lourdes et parfois très compliquées à mettre en place. C'est pourquoi ce genre d'analyse reste rare en géographie. Par ailleurs, si ces analyses permettent de quantifier et de mesurer l'impact de la propagation de l'incertitude sur les prises de décision, elle ne l'intègre pas dans le processus de modélisation même. Or cette gestion de l'incertitude s'avère parfois indispensable dans certains cas comme celui de la modélisation de l'évolution de l'occupation du sol, où le caractère même du phénomène est incertain. Une solution possible consiste alors à utiliser des modèles intégrant l'incertitude dans leur infrastructure. C'est le cas des systèmes experts qui, de par leur nature, sont capables de gérer l'incertitude à différents niveaux du processus de modélisation.

1.3.3.2. Le choix d'un modèle pour simuler la couverture hivernale des sols en contexte agricole intensif

Dans le cadre précis de simulations à court terme de l'évolution de la couverture hivernale des sols, les informations recueillies pour produire les simulations sont à la fois imprécises (par exemple, « Les parcelles sont considérées comme nues à peu couvertes lorsqu'elles sont occupées à moins de 20 % environ par un couvert végétal ») et incertaines (par exemple, « Tel exploitant agricole, après avoir cultivé des céréales pendant quatre années de suite sur une parcelle donnée, va probablement semer une prairie » ou encore « On ne peut absolument pas faire d'hypothèse sur ce que sera sa décision »), qu'elles proviennent du traitement des séries d'images de télédétection, d'enquêtes et de relevés effectués sur le terrain, de statistiques agricoles ou encore d'avis d'experts. En conséquence, ***les simulations effectuées doivent : (1) prendre en compte le niveau d'imprécision et d'incertitude associés aux données (2) associer un niveau d'incertitude aux résultats produits.*** Cette dernière condition vise à augmenter la crédibilité des documents produits : ainsi, lorsque le doute est trop élevé sur la décision à prendre, il est préférable de s'abstenir. L'approche approximative s'impose donc ici clairement dans ce cas.

Le modèle doit par ailleurs être capable de gérer l'incertitude et l'imprécision, tout au long du processus de modélisation. Le modèle de type expert, reposant sur la théorie des évidences de Dempster-Shafer apparaît pour ce cas le plus pertinent. A l'inverse des modèles généralement utilisés, la théorie des évidences introduit en effet de l'incertitude dans le processus de modélisation, permet l'expression de l'ignorance ou de l'imprécision dans le corpus de connaissances, et établit que le niveau de confiance dans une hypothèse donnée n'est pas nécessairement le complément de sa négation (Eastman, 1997), laissant ainsi la place à l'incertitude et au doute.

Chapitre 2

Modélisation prédictive à partir de la théorie des évidences

Le principe de l'utilisation d'un modèle de type expert utilisant la théorie des évidences a été retenu pour modéliser l'évolution à court terme de la couverture hivernale des sols. De fait, la nature même de la couverture hivernale des sols, des connaissances et des données disponibles pour prédire son évolution imposent la prise en compte des notions d'incertitude et d'imprécision tout au long du processus de modélisation, de la formalisation des données d'entrée dans le modèle, jusqu'à la production des résultats. Ce type de modèle, s'il a déjà été utilisé dans de nombreux domaines d'application, n'a jamais encore jamais été appliqué pour effectuer une prédiction de l'évolution future de l'occupation et de l'utilisation des sols. Les étapes conduisant à la production de prédictions de l'usage des terres doivent donc être détaillées, de façon à comprendre les résultats obtenus.

De plus, prédire les changements de façon vraisemblable suppose une bonne connaissance des changements passés. Une approche modélisatrice de type prédictif nécessite donc la détermination précise de l'historique des changements et l'identification des facteurs qui expliquent ces changements, tout en prenant compte les différentes échelles spatiales et temporelles auxquelles les changements se produisent et sont analysés.

En conséquence, les principes de la théorie des évidences, les différentes étapes du processus de modélisation mis en œuvre dans le cadre de cette théorie et ses principales applications font l'objet de la première partie. Le site expérimental choisi, pour lequel l'étude de l'évolution du couvert hivernal s'avère être un enjeu environnemental clé, ainsi que l'ensemble des données utilisées dans le cadre de cette application sont ensuite présentés et analysés. Enfin, l'application réalisée sur le site expérimental est exposée en dernière partie avec une description des différentes étapes de travail qui le composent, de la constitution des données d'entrée jusqu'à la production de résultats qui font l'objet d'une analyse détaillée.

2.1. La théorie des évidences de Dempster-Shafer

La théorie des évidences de Dempster-Shafer, appelée également théorie du raisonnement plausible, est souvent considérée comme une généralisation de la théorie bayésienne des probabilités subjectives (Dezert, 2003). Développée pour la première fois par Dempster en 1968 et améliorée par Shafer en 1976, elle est basée sur un fondement mathématique robuste qui permet de représenter l'incertitude que l'on peut avoir sur une information ou un phénomène à traiter. La théorie de Dempster-Shafer, que l'on nommera DST (Dempster-Shafer Theory), est un outil théorique puissant qui permet de manipuler des informations entachées d'incertitudes et d'imprécisions et qui combine, *via* la règle de fusion définie par Dempster, différentes sources d'information en vue d'une prise de décision.

2.1.1. Notions fondamentales

2.1.1.1. Une extension de la théorie de Bayes

La théorie de Dempster-Shafer peut être analysée comme une extension de la règle de Bayes. La théorie probabiliste Bayésienne, elle-même issue de la théorie classique des probabilités, permet de combiner une nouvelle évidence (c'est-à-dire une connaissance sur un phénomène ou processus quelconque) avec une connaissance définie *a priori* sur une hypothèse donnée, pour estimer la vraisemblance que cette hypothèse soit juste ou pas. Elle consiste ainsi à déterminer une règle de décision qui choisit l'hypothèse ayant la probabilité *a posteriori* maximale de se dérouler (Bracker, 1996).

La théorie de Bayes suppose connue les deux informations suivantes :

- ⇒ La probabilité *a priori* $p(h)$ de l'événement en question ;
- ⇒ La probabilité conditionnelle $p(e/h)$ d'une observation, telle que :

$$p(h / e) = \frac{p(e / h) \cdot p(h)}{\sum_i p(e / h_i) \cdot p(h_i)}$$

Le cas le plus simple rencontré considère seulement deux hypothèses. La première question posée est de savoir s'il existe une connaissance *a priori* permettant d'attribuer une probabilité plus forte à l'une des deux hypothèses. Le cas échéant, une « probabilité *a priori* », c'est-à-dire, une probabilité sans relation avec les évidences $p(h)$ et permettant d'établir que l'hypothèse est vraie, est affectée à une des deux hypothèses. Dans le cas contraire, c'est-à-dire s'il n'existe aucune hypothèse de probabilité supérieure aux autres, les hypothèses sont intégrées dans le processus de combinaison avec des valeurs égales. La probabilité conditionnelle $p(e/h)$ exprime la probabilité que les évidences soutenant chaque hypothèse soient pertinentes. La probabilité *a posteriori* $p(h/e)$ exprime quant à elle la probabilité que l'hypothèse soit vérifiée à partir des évidences prédéfinies.

La théorie de Bayes est souvent utilisée dans le cadre de l'amélioration des classifications des images satellitaires (Bracker, 1996). Par exemple, la classification d'images par la technique du maximum de vraisemblance utilise ce théorème qui autorise l'affectation d'un poids dominant à une des composantes de l'image. Le principal avantage de la théorie probabiliste fondée sur le théorème de Bayes est sa prise en compte du contexte spatial. Par ailleurs, elle conduit à la détermination de fonctions discriminantes qui permettent

une prise de décision optimale grâce à la création de statistiques sur les relations existant entre les évidences et la prise de décision. Cependant, ses principales limites reposent sur le fait qu'elle ne prend pas en compte l'ignorance sur une hypothèse donnée et qu'elle requiert des informations très fines sur les évidences considérées.

2.1.1.2. *Le cadre de discernement*

La théorie des évidences décrit un « cadre de discernement » Θ (« frame of discernment ») ou ensemble d'« hypothèses » élémentaires envisageables pour la solution du problème posé (Dezert, 2003). Ce cadre contient toutes les hypothèses (θ_i) nécessaires à la description complète d'un problème posé :

$$\Theta_i = \left\{ \theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N \right\}$$

Le nombre N indique le nombre total d'hypothèses ; Θ doit être exhaustif et l'ensemble des hypothèses qui le composent exclusives. Dans la théorie de Dempster-Shafer, le raisonnement porte sur l'ensemble des parties 2^Θ appelé également « power-set », qui est l'ensemble de tous les sous-ensembles de Θ . Tous les éléments de ce « power-set » correspondent à une proposition disjonctive (union de « singletons ») du cadre de discernement.

Le nombre de sous-ensembles est dépendant du nombre d'hypothèses contenues dans Θ . Pour trois hypothèses A, B et $C \subseteq \Theta$, on obtient ainsi sept sous-ensembles (Figure 13) :

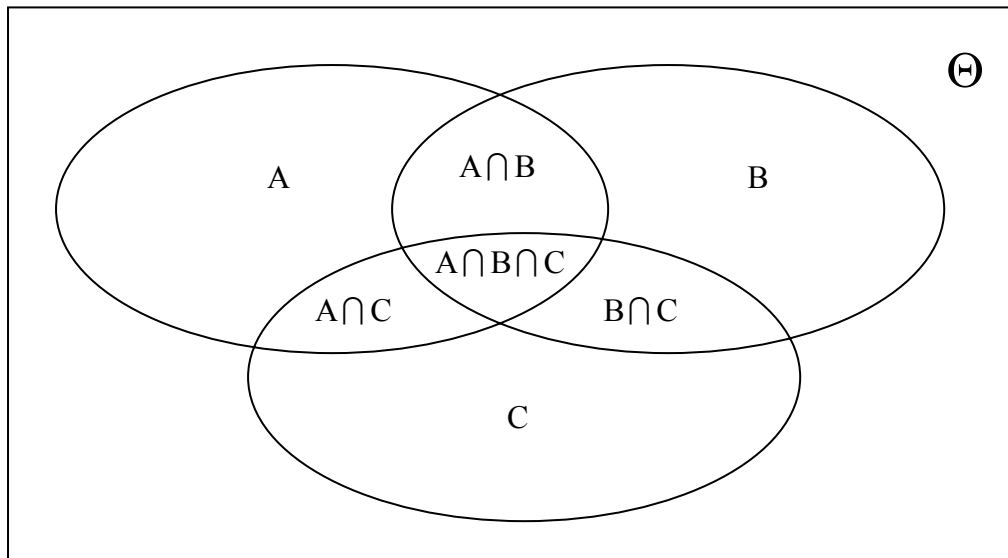


Figure 13- Sous-ensembles d'un cadre de discernement Θ composé de trois hypothèses A, B et C

L'union de deux hypothèses est considérée par Shafer comme une « proposition » exprimant en cela l'incertitude. A et B sont nommés « singletons ». On obtient pour cet exemple :

$$2^{\Theta} = \{A, B, C, A \cup B, A \cup C, B \cup C, A \cup B \cup C, \emptyset\}$$

La théorie de Dempster-Shafer comprend trois types d'opérations : (1) la définition des fonctions de masses, de crédibilité et de plausibilité (2) la fusion des informations par la règle de Dempster (3) la prise de décision.

2.1.1.3. Les fonctions de masses élémentaires

L'expression d'un degré de confiance, appelé croyance, pour chacun des sous-ensembles de Θ est effectué à travers l'affectation d'une masse élémentaire (m) définie de 2^{Θ} sur $[0,1]$ de la façon suivante :

$$m(\emptyset) = 0 \text{ et } \sum m(A) = 1 \text{ où } A \subseteq \Theta$$

$m(\cdot)$ représente la masse d'évidence associée à une source d'information sur un certain nombre d'hypothèses ou de propositions du cadre de discernement. Aucune croyance n'est affectée à l'ensemble vide (\emptyset). Par ailleurs, la somme de toutes les fonctions de masse attribuées aux différents sous-ensembles d'une hypothèse devront être égales à 1. $m(A)$ correspond à la masse de croyance « directe » affectée à l'hypothèse ou proposition A, c'est-à-

dire au degré de confiance accordé à A selon les sources d'information (appelés également sources d'évidences). Par ailleurs, il faut noter que si l'on considère deux sources d'information ou évidences 1 et 2, $m(A_1)$ et $m(A_2)$ peuvent être tous les deux nuls sans pour autant que l'on obtienne $m(A_1 \cup A_2) = 0$, c'est-à-dire que l'union des sources d'évidence soit nulle, une masse pouvant être affectée à l'union des hypothèses. Par conséquent, un jeu de masse quelconque $m(.)$ s'avère différent d'une mesure de probabilité.

2.1.1.4. La fonction de croyance

- La fonction de croyance (Cr) (ou crédibilité) est dérivée des fonctions de masse. Ainsi, $Cr(A)$ totalise toutes les raisons de soutenir l'hypothèse A. La mesure de la croyance (Cr) s'effectue sur le cadre de discernement, mais il est possible de la représenter par rapport à une fonction de masse comme suit :

$$Cr(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B)$$

Pour calculer la croyance de l'hypothèse A, il faut donc effectuer la somme de toutes les propositions B qui sont strictement inclus dans A. La fonction de croyance peut donc être interprétée comme la borne inférieure d'une mesure de vraisemblance (Bracker, 1996). Une fonction de croyance nulle représente ainsi l'ignorance totale sur le problème considéré. Dans le cas d'une fonction de crédibilité particulière où $Cr(\Theta) = 1$ et $Cr(A \cup B) = Cr(A) + Cr(B)$ quand $A, B \subset \Theta$ et $A \cap B = \emptyset$, on a alors affaire à une fonction de crédibilité bayésienne qui correspond à une mesure classique de probabilité. C'est à ce titre que la DST est généralement considérée comme une extension de la théorie des probabilités.

2.1.1.5. La fonction de plausibilité

La plausibilité (Pl) est également dérivée des fonctions de masse. La fonction de plausibilité $Pl(A)$ exprime l'intensité avec laquelle on devrait soutenir l'hypothèse A si tous les faits non connus allaient dans le sens de cette hypothèse. Elle peut être définie de deux manières différentes (Bracker, 1994) :

→ Soit par la fonction de croyance de l'évènement contraire à A, notée A^c

$$Pl = 1 - Cr(A^c)$$

→ Soit par rapport à la fonction de masse qui correspond à la définition originale de Dempster :

$$PL (A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m (B)$$

Ainsi, la plausibilité représente le niveau de vraisemblance maximum d'une hypothèse donnée.

$Cr(A)$ et $Pl(A)$ ont une valeur comprise dans l'intervalle $[0,1]$. A partir de ces deux valeurs, on peut déterminer une probabilité inconnue nommée « intervalle de croyance (Ic) » ou « intervalle de confiance » qui correspond à :

$$Cr(A) \leq Ic(A) \leq Pl(A)$$

2.1.2. La règle de Fusion de DST

2.1.2.1. Principe

Dans ses travaux, G. Shafer (1976) a proposé la règle de combinaison de Dempster, symboliser par \oplus , pour combiner ou fusionner deux sources d'informations distinctes. Ces dernières sont couramment appelées « sources d'évidence » (B_1 et B_2) ; présumées équitablement fiables, elles expriment des degrés de confiance sur les propositions d'un cadre de discernement. Pour reprendre une notation courante, on notera $m_1 (.)$ et $m_2 (.)$, Cr_1 et Cr_2 , les jeux de masses et les fonctions de croyance relatives à B_1 et B_2 .

La fonction de croyance globale est obtenue, dans le cadre de la DST, à partir de la combinaison des jeux de masse $m_1 (.)$ et $m_2 (.)$. Elle s'exprime de la façon suivante :

$m(\emptyset) = 0$ et $\forall C \neq \emptyset$ et tel que $C \subseteq \Theta$, on obtient :

$$m(C) \equiv [m_1 \oplus m_2](C) = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A)m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)}$$

$\sum_{A \cap B = C}$ représente la sommation sur tous les sous-ensembles $A, B \subseteq \Theta$ tels que $A \cap B = C$. La constante de normalisation (K), qui correspond au dénominateur, doit être non nulle. Si $K = 0$, la combinaison entre les sources d'information est impossible. Cela signifie que les sources d'évidence B_1 et B_2 qui viennent soutenir chaque hypothèse sont totalement contradictoires. Le conflit (k) est alors total et proche de 1.

La règle de fusion de Dempster-Shafer peut être illustrée par un exemple appliqué à la couverture hivernale des sols :

Soit le cadre de discernement $\Theta = \{\text{Sol Nu (Sn)}, \text{Sol Couvert (Sc)}\}$ décrivant les hypothèses d'occupation du sol pour l'hiver suivant sur le territoire agricole. Pour chaque hypothèse, deux experts m_1 et m_2 émettent l'avis suivant :

$$m_1(\text{Sn}) = 0,85 ; m_1(\text{Sc}) = 0,05 ; m_1(\text{Sn} \cup \text{Sc}) = 0,1$$

$$m_2(\text{Sn}) = 0,7 ; m_2(\text{Sc}) = 0,02 ; m_2(\text{Sn} \cup \text{Sc}) = 0,28$$

Dans ce cas, l'application de la règle de fusion de DST pour l'hypothèse « Sol nu » est la suivante :

$$m(\text{Sn}) = \frac{m_1(\text{Sn}) m_2(\text{Sn}) + m_2(\text{Sn}) m_1(\text{Sn} \cup \text{Sc}) + m_1(\text{Sn}) m_2(\text{Sn} \cup \text{Sc})}{1 - [m_1(\text{Sn}) m_2(\text{Sc}) + m_1(\text{Sc}) m_2(\text{Sn})]}$$

$$m(\text{Sn}) = \frac{0,595 + 0,07 + 0,238}{1 - [0,017 + 0,035]}$$

$$m(\text{Sn}) = \mathbf{0,9525}$$

La règle, appliquée pour l'hypothèse « sol couvert » et pour l'union des hypothèses donne les résultats suivants :

$$m(\text{Sc}) = \mathbf{0,0179}$$

$$m(\text{Sn} \cup \text{Sc}) = \mathbf{0,0295}$$

$$m(\text{Sn}) + m(\text{Sc}) + m(\text{Sn} \cup \text{Sc}) = 1$$

Dans ce cas, le niveau de conflit entre les sources est très faible puisque K est très proche de 1 (0,948). La prise de décision est aisée, la croyance, affectée à l'hypothèse « Sol nu », étant très élevée. On constate à travers cet exemple que la règle de fusion de DST est commutative et associative, c'est à dire que l'ordre de la combinaison n'a pas d'importance. Par ailleurs, la définition d'une fonction de masse représentant l'ignorance totale, par exemple $m(A) = 0$ ne modifierait pas les informations acquises au préalable.

2.1.2.2. Quelques commentaires

La règle de fusion de la DST a été fortement contestée dans les dernières décennies en raison de son manque de justification théorique, problème résolu grâce aux travaux de Smets

(1990) qui a proposé une nouvelle axiomatique basée sur le modèle des croyances transférables.

Un des avantages de la règle de fusion de Dempster-Shafer réside dans son caractère commutatif et associatif qui rend son implémentation relativement aisée (<http://iridia0.ulb.ac.be/psmets/>). Par ailleurs, dans le cas de deux hypothèses, l'application de la règle, même si les sources d'informations sont nombreuses, reste très simple. C'est là un des avantages de la DST qui autorise un nombre théorique illimité de sources d'informations à condition qu'elles soient indépendantes.

Toutefois, La complexité de la mise en œuvre de la règle de fusion de la DST varie exponentiellement avec la cardinalité du cadre de discernement Θ , c'est-à-dire le nombre de propositions contenu dans Θ (Dezert, 2003). De plus, l'indépendance des sources, pré-requis nécessaire dans la règle de fusion de la DST, reste une condition souvent difficile à vérifier pour des données réelles. La distribution normale des classes reste une approche fréquemment utilisée pour considérer la corrélation entre elles (Braker, 1996), on peut néanmoins s'en affranchir si les sources d'évidence utilisées ne sont pas statistiques. Une autre difficulté, qui fait toujours l'objet de nombreuses recherches dans la communauté de la fusion de données, est lié à la mauvaise gestion du conflit par cette règle de fusion dans le cas de sources d'évidence fortement conflictuelles entre elles. Ce problème pouvant, dans certains cas, générer des résultats aberrants (Zadeh, 1979).

2.1.3. La prise de décision

La prise de décision dans la DST est une étape difficile qui a fait et fait toujours l'objet de nombreux débats. De multiples critères de décision ont ainsi été proposés (Yager, 1986 ; Bracker, 1996 ; Sudano, 2002), contrairement à la théorie bayésienne, où le maximum de vraisemblance est le critère le plus souvent retenu. Parmi les règles de décision les plus souvent retenues se trouvent : le maximum de crédibilité ; le maximum de plausibilité ; les règles basées sur l'intervalle de confiance; la probabilité pignistique et la décision par maximum de vraisemblance. La première peut être considérée comme totalement non risquée, mais sous-estime de fait l'appartenance à une classe donnée, dans la mesure où elle ne retient que les cas pour lesquels il n'y a pas d'incertitude (Figure 14). A l'inverse, la seconde peut être considérée comme trop risquée, puisqu'elle retient la limite supérieure de l'intervalle de vraisemblance, incluant tous les cas incertains. Dans la mesure où la réalité se situe quelque part dans l'intervalle [Crédibilité ; Plausibilité], il apparaît ainsi préférable d'exclure ces deux règles. Dès lors, la question de la détermination du seuil sur cet intervalle se pose avec acuité. Deux voies peuvent être considérées : une voie supervisée, la décision se fondant empiriquement sur des connaissances *a priori* ; une voie non supervisée, la décision

étant alors prise sur des critères statistiques. La deuxième voie doit être privilégiée pour deux raisons : éviter d'introduire des erreurs de jugement, et rendre la méthode reproductible.

Ainsi, la probabilité pignistique est une mesure de probabilité subjective qui se trouverait entre la mesure de crédibilité et de plausibilité (Smets, 1990b) Elle est exprimée de la façon suivante :

$$\forall \theta_i \in \Theta, P \left\{ \theta_i \right\} = \sum_{B \subseteq \Theta | \theta_i \in B} \frac{1}{|B|} m(B)$$

L'intérêt de la mesure de la probabilité pignistique réside dans le fait qu'elle offre un compromis intéressant entre la croyance et la plausibilité, défini de façon objective.

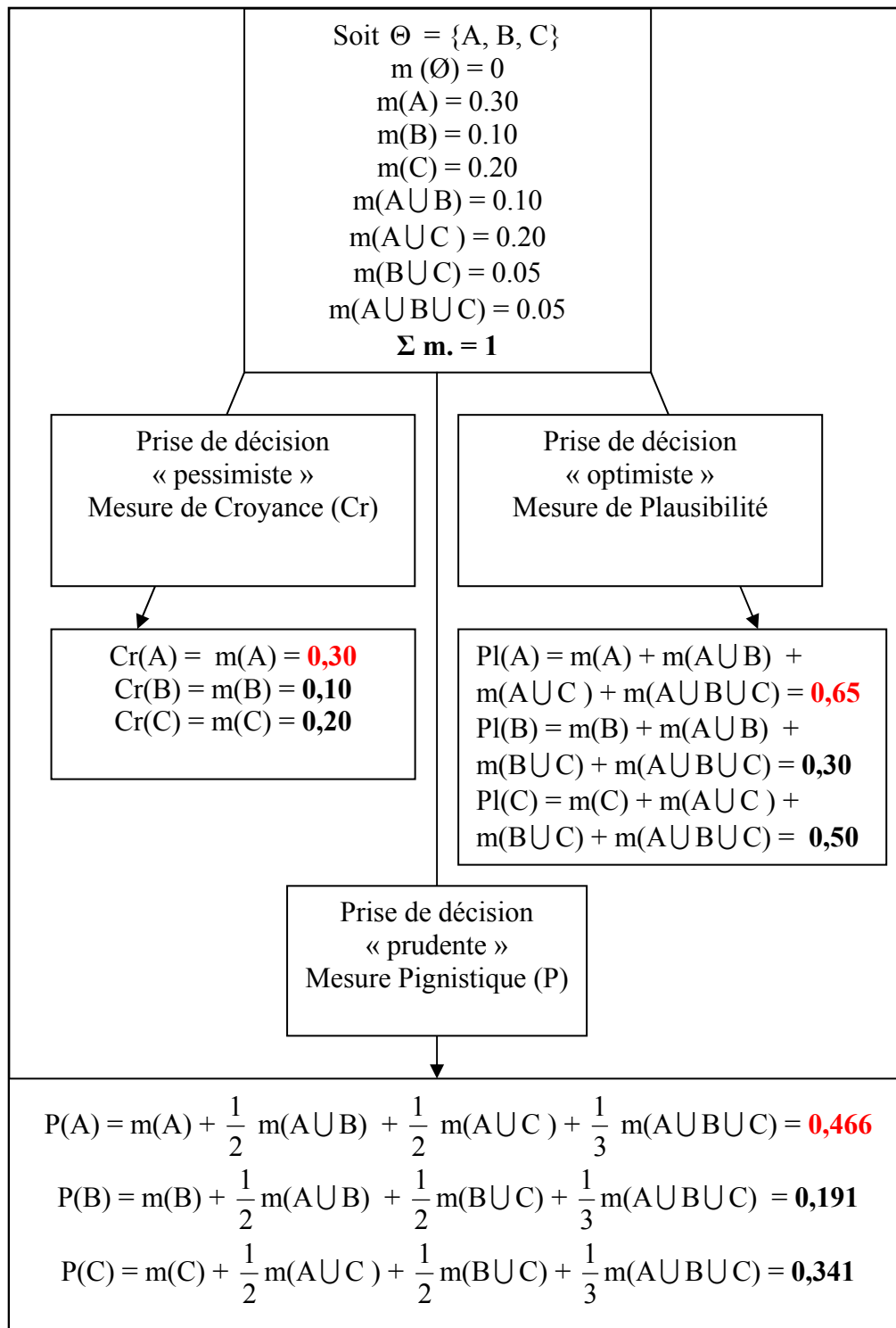


Figure 14- Exemple de fusion de données avec la théorie de Dempster-Shafer

2.1.4. Applications de la DST

La théorie des évidences de Dempster-Shafer a été utilisée pour de multiples applications. Des applications détaillées de la théorie de Dempster-Shafer sont exposées dans le manuel d'Eastman (1997) et dans un article de Mertikas et Zervakis (2001). Cette théorie est généralement appliquée pour fusionner des données de différentes sources, incluant les images de télédétection pour certaines applications. Ainsi, la théorie de Dempster-Shafer est fréquemment utilisée pour mettre en évidence des changements d'occupation et d'utilisation des sols à partir d'images satellitaires, de photographies aérienne et d'autres types de données (Leduc *et al.*, 1998).

Dans le cas de l'emploi exclusif d'images de télédétection avec des données issues de différents capteurs, les objectifs poursuivis sont l'amélioration des classifications (Srivasan. et Richards, 1990 ; Bracker, 1996 ; Roux 1997 ; Pigeon, 2001), de la détection de changement, ou le changement d'échelles (Le Hégarat *et al.*, 2003).

D'une façon générale, les résultats des différentes recherches effectuées sur les classifications d'images avec la théorie des évidences concordent avec un gain de fiabilité. Elle permet de préserver les pixels-mixtes ou litigieux jusqu'à la prise de décision finale, augmentant ainsi la précision finale de la classification. Les cartes résultantes montrent ainsi des classes avec leurs différents niveaux de certitude ou de confiance associée. L'avantage principal de la théorie des évidences est qu'elle permet d'utiliser des données, issues de diverses sources et dans des formes diverses (nominales et/ou numériques). Si l'on compare la théorie des évidences de Dempster-Shafer à la théorie de Bayes, l'atout principal de la première est sa capacité d'exprimer le degré d'ignorance dans un processus de modélisation donné.

A titre d'exemple pour les applications relevant de la détection de changement, Le Hégarat-Masclé et Seltz (2004) ont récemment proposé une méthode consistant à détecter un changement d'occupation du sol entre deux images satellites de dates différentes à partir de la fusion de différents indices de changements en utilisant la théorie de Dempster-Shafer. Cette approche a été appliquée à la détection des changements de la couverture hivernale des sols entre deux années successives avec des images SPOT sur le bassin versant du Yar (bassin expérimental retenu pour la modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols, voir partie suivante). Au total, 18 indices de changement basés sur des opérations pixel à pixel, sur des paramètres texturaux et sur la théorie de l'information (Shannon et Weaver, 1963) ont été appliqués à l'image de référence qui est dans ce cas un indice de végétation calculé sur une scène SPOT4 HRVIR, datant du 27/01/2001 et une scène SPOT5 du 17/12/2003. La fusion des trois meilleurs indices à travers la règle de la DST a permis d'améliorer de 10% la détection des changements de couverture du sol, comparativement aux taux obtenus pour ces

mêmes indices mais pris séparément. Pour cette application, la performance reste néanmoins tributaire de la qualité et de la complémentarité des indices de changements fusionnés.

La théorie des évidences n'a jamais encore été utilisée pour prédire l'utilisation future des sols. Ce type d'application est donc envisagé dans le cadre de ce travail avec l'objectif précis de répondre à la question : Où les modifications de couverture des sols vont-elles probablement se produire l'hiver prochain ? L'originalité de la démarche réside dans l'introduction d'une dimension temporelle dans la modélisation *via* l'introduction dans les sources d'information de l'historique de l'utilisation des terres dérivé d'une série d'images satellitaires.

2.2. Présentation du site d'étude et des données

Le choix du site d'étude a été guidé par plusieurs critères : il fallait en premier lieu que la problématique du suivi de la couverture hivernale des sols constitue un enjeu important pour ce site, qu'il soit représentatif des modes de production rencontrés à l'échelle régionale, et qu'une base de données comprenant des informations permettant de retracer l'historique des changements passés et de structurer les conjectures sur le devenir de l'évolution des modes d'occupation des sols, soit disponible. De plus, la prédiction du devenir d'un territoire nécessite des connaissances « expert » à différents titres : pour l'identification des facteurs des changements passés, leur hiérarchisation qualitative, la détermination du degré de confiance placée dans chacune des hypothèses émise, et enfin la validation des résultats. Ainsi, le bassin versant expérimental du Yar, un des sites-ateliers labellisé par le Ministère de la Recherche dans le cadre du Programme Environnement, Vies et Sociétés (PEVS) localisé sur la façade littorale nord de la Bretagne, a été retenu dans la mesure où il répondait parfaitement à l'ensemble de ces critères.

L'objectif de cette partie est de présenter le site expérimental du Yar et la base de données associée à ce site, les données mentionnées étant exclusivement celles qui ont servi à modéliser l'évolution de la couverture hivernale des sols.

2.2.1. Un contexte environnemental marqué par des marées vertes

Situé à l'extrême ouest du département des Côtes d'Armor, en limite du département du Finistère, et d'une superficie de 61.5 km² (Figure 15), ce bassin versant littoral a été identifié comme étant à l'origine de plus de 60% des marées vertes marquant depuis plusieurs années la Baie de Lannion, le bassin versant du Roscoat étant pour sa part responsable du phénomène à hauteur de 25% (Ifremer, 1999). Plusieurs caractéristiques physiques, associées aux activités anthropiques, font de la Baie de Lannion un espace prédisposé au développement des algues

vertes. Les études de courantologie effectués par l’Ifremer ont ainsi démontré que cette Baie, de par sa morphologie, est extrêmement confinée. Les courants y sont très faibles, ce qui empêche les eaux douces provenant des rivières de se mélanger avec les eaux de la mer. Par ailleurs, les fonds marins sont très peu profonds, ce qui au printemps et en été favorise un réchauffement rapide des eaux de surface.

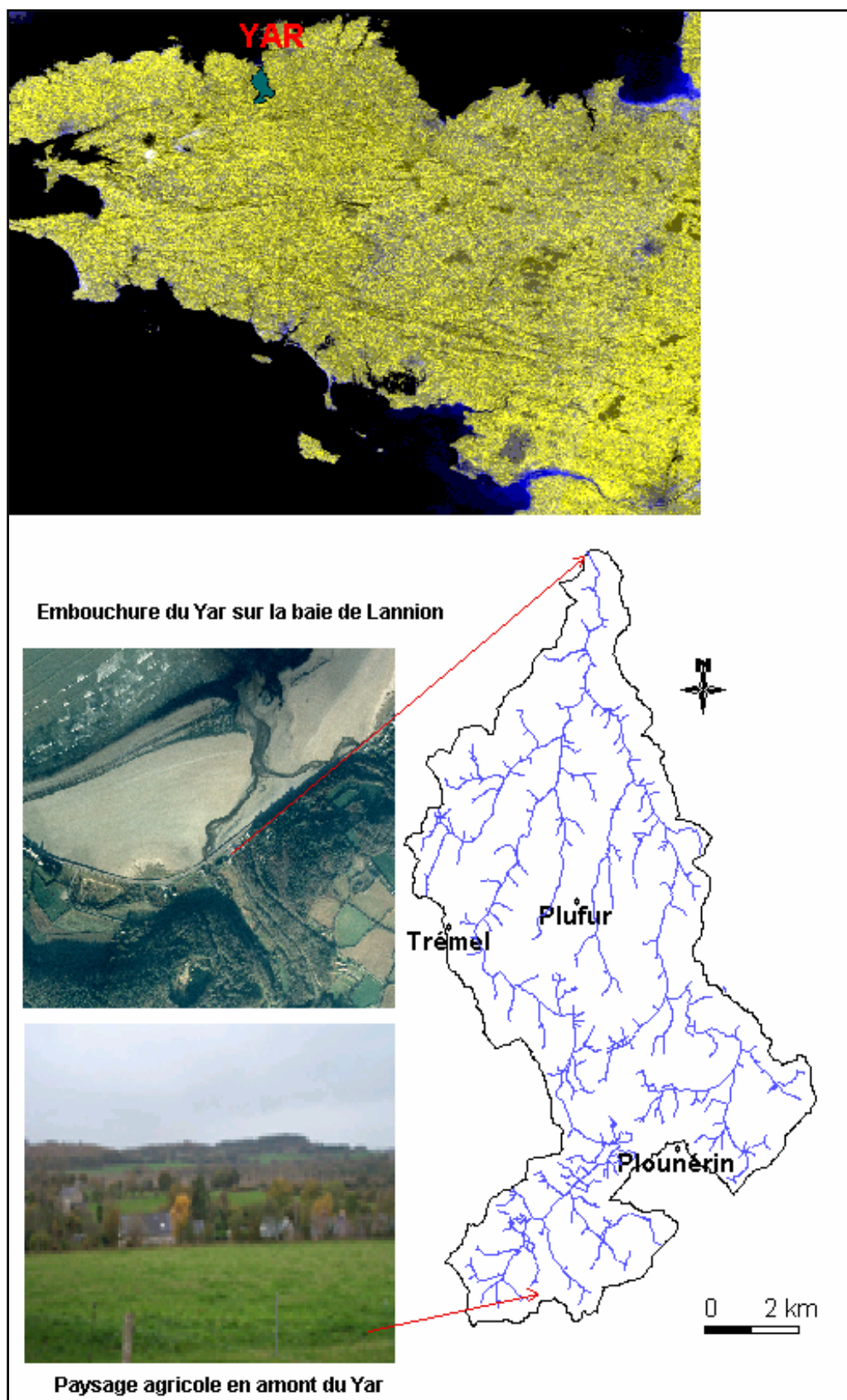


Figure 15- Localisation du site d'étude (Bassin-versant du Yar)

Ce secteur est marqué par un climat océanique marqué. Les températures sont donc douces toute l'année et caractérisées par de faibles amplitudes journalières et saisonnières. Par conséquent la minéralisation produite en amont sur le bassin versant peut être importante même au cours de l'hiver, ce qui accroît les stocks de nitrates potentiellement lessivables à une période où les besoins azotés de la végétation sont les plus faibles. La pluviométrie moyenne sur le bassin versant s'échelonne autour de 900 mm/an avec une répartition à peu près régulière toute l'année et un excédent hydrique l'hiver surtout en amont du bassin versant où les précipitations sont plus importantes. Ces conditions climatiques favorisent le lessivage de nitrates en hiver. Par ailleurs, la majeure partie du bassin versant a un socle granitique qui a donné naissance à des sols moyennement profonds et peu hydromorphes. La circulation de l'eau y est donc rapide et orientée verticalement (Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999). Le moindre excès d'eau hivernal provoque un lessivage des nitrates en profondeur jusqu'aux nappes qui se retrouvent chargées en nutriments azotés. L'été, ces nappes alimentent les cours d'eau et permettent le maintien d'un débit d'étiage important avec une réserve de nitrates conséquente qui contribue à alimenter la Baie et donc le développement des algues durant cette saison. La conjugaison de ces facteurs est naturellement propice au développement de l'algue verte de type *ulva* dont la présence avait déjà été observée dans la Baie dès le début du 20^{ème} siècle.

Ce phénomène d'eutrophisation restait cependant de faible envergure jusqu'à ces dernières décennies, car les algues vertes sont normalement limitées dans leur croissance à partir du printemps, en raison de la diminution naturelle importante de la disponibilité en sels nutritifs. Une évolution croissante des apports azotés dans la Baie par les rivières a changé radicalement cet état de fait (Figure 16). Ainsi, une étude du CEVA (Centre d'Etudes et de Valorisation des Algues) a estimé, à partir de missions aériennes, la production d'algues vertes sur la période 1993-1997 : chaque année environ 2800 tonnes d'ulves se développent entre mai et septembre en Baie de Lannion. L'origine de ces apports azotés est essentiellement agricole. La faiblesse des courants et le confinement de la Baie ne contribuant pas à ralentir la dilution de ces apports, l'algue verte peut ainsi se développer en été, période durant laquelle sa croissance était auparavant très limitée. Son développement conduit à des échouages importants couvrant des estrans entiers et pouvant être définitivement rejetés en haut de plage où leur dégradation constitue une nuisance olfactive et visuelle importante. Sa présence engendre également des conséquences économiques directes et indirectes. L'échouage des algues a un coût très important, sur le secteur de Saint-Michel-en-Grève (Est de la Baie), il s'élevait à 427 000 francs en 1997 pour 9700 m³ d'algues ramassées. Une autre conséquence, indirecte, est la baisse progressive et croissante de la fréquentation touristique.

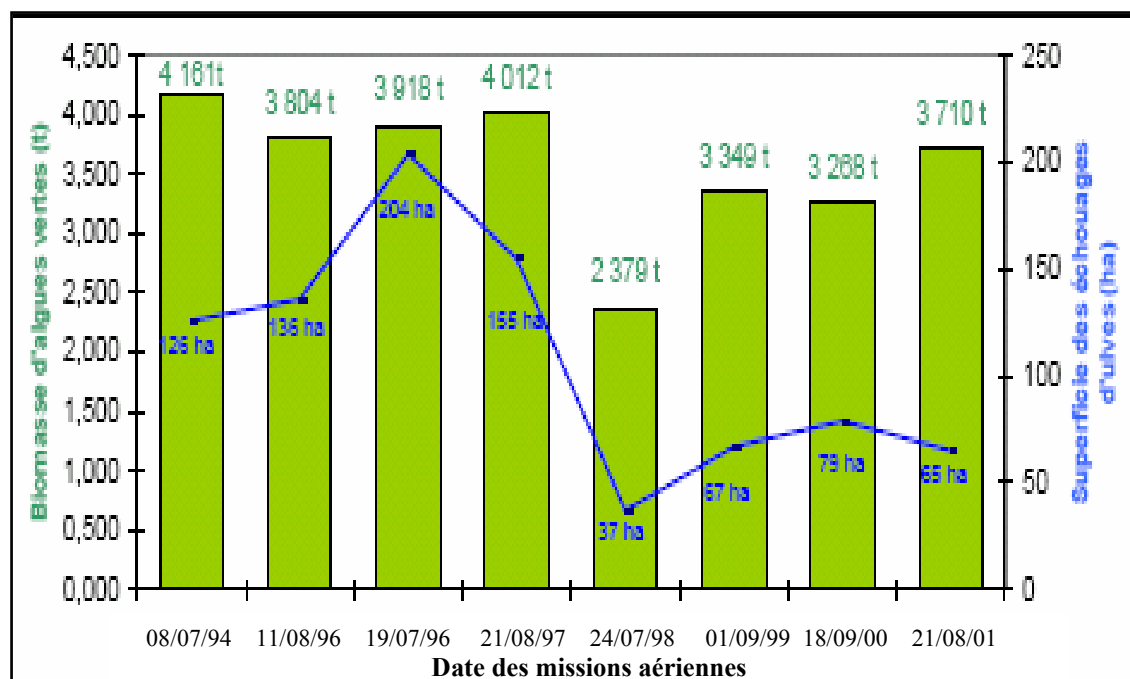


Figure 16 - Evolution des échouages d'algues vertes depuis 1994 dans la baie de Lannion (Source : CEVA)

Ce fort développement étant lié aux conditions physiques de la Baie et aux apports nutritifs régulier en azote par les rivières, les actions entreprises pour réduire ce phénomène d'eutrophisation se sont logiquement orientées vers une limitation des apports en nutriments, notamment à travers le programme « Réduction des marées vertes » initié par le Conseil Général des Côtes d'Armor. Elles sont focalisées surtout sur les apports azotés, car des études montrent que limiter les flux de phosphore ne permet pas de lutter contre le développement des marées vertes. Les besoins d'ulves en phosphore sont en effet très faibles et la quantité d'ulves naturellement présente dans la Baie leur suffit amplement pour couvrir leurs besoins (Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999). Les algues ont en revanche un besoin important en azote. Leur réduction constituerait ainsi un facteur limitant efficace contre leur développement.

Actuellement, les concentrations en nitrates dans le Yar atteignent en moyenne environ 30 mg/l, ce qui n'est pas très important dans le contexte breton. Cependant, étant donnée la configuration de la Baie, elles restent encore trop élevées. Un modèle mathématique des cycles de l'azote et du phosphore du milieu côtier développé par l'Ifremer (IFREMER, 1999) a été appliqué sur la Baie de Lannion. Il en ressort que pour diminuer d'un tiers la prolifération algale, le flux nutritif doit être divisé par deux, ce qui implique de passer de la

concentration actuelle de 35 mg/l à une concentration de moins de 20 mg/l. Les mesures permettant de diminuer ces concentrations doivent être appliquées en priorité sur le bassin versant du Yar qui fournit à lui seul 60% des apports azotés. Avec ce modèle, les différents scénarii élaborés montrent qu'avec un apport de NO₃ du Yar réduit de 75%, la masse algale connaîtrait un abattement de 51% par rapport à la situation réelle de 1994 pour la Grève de Saint-Michel. En revanche, avec une concentration du Yar abaissée à 25 mg/l toute l'année, cette baisse ne dépasserait pas 4% (Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999).

Cependant, il faut interpréter ces résultats avec prudence, car ils n'intègrent pas les temps de transfert de l'eau au sein du bassin versant vers le réseau hydrographique. Ces derniers sont variables suivant la position topographique considérée (IFREMER, 1999) : ils varient de quelques mois en fonds de vallées et sur les versants à plus d'une année dans les zones de plateaux. Par ailleurs, d'autres phénomènes complexes interviennent dans le temps de transfert des nitrates, comme les processus biogéochimiques qui viennent interagir en accroissant les taux de nitrates par minéralisation ou en les abaissant par transformation du nitrate en azote atmosphérique, par exemple par l'intermédiaire des zones humides. Enfin, la part de circulation d'eaux superficielles par rapport à celle des eaux profondes est mal connue, ces dernières ayant des temps de transfert estimés à plusieurs dizaines d'années. Les transferts des nitrates dans le milieu étant très complexes -et dans le cas breton important-, des « stocks » ont pu se constituer. Aussi faut-il penser qu'une baisse des apports d'azote dans le milieu ne sera pas automatiquement suivie d'une baisse visible rapide des algues dans la Baie. Toutefois, une diminution des surfaces algales, même à moyen et long terme, passe nécessairement, et dès à présent, par une diminution des apports azotés et phosphorés, et donc par un changement des pratiques agricoles.

2.2.2. Une production agricole orientée vers l'élevage bovin

L'agriculture constitue l'activité dominante sur le bassin versant et marque fortement son occupation et utilisation du sol.

De façon générale, le bassin versant du Yar appartient à une région orientée essentiellement vers l'élevage bovin (Conseil Général des Côtes d'Armor/ENSAR, 1999) avec une large prédominance de la production lait/viande bovine. Cette orientation dominante explique d'ailleurs en partie le fait que les zones humides et le réseau bocager, qui ont un impact sur le transfert de flux polluants, sont relativement bien conservées sur ce bassin versant, comparativement à d'autres secteurs bretons (Hubert-Moy, 2003, Chaplot *et al.*, 2000, Maltby *et al.*, 1996,...). La production hors-sol y est surtout de type avicole (uniquement volaille chair), la production porcine étant peu présente sur le bassin versant. On

note également la présence de quelques producteurs ovins, d'un maraîcher biologique et d'un céréalier (Figure 17).

En moyenne, l'assolement est caractérisé par un système fourrager maïs/herbe (près des trois-quarts de la surface exploitée), avec une large prédominance de l'herbe (près de 50 % de la surface exploitée). La surface moyenne par exploitation est de 49,80 ha avec un écart type de ± 31.40 ha qui traduit la grande diversité des moyens de production qui existe entre les différentes exploitations (moyenne départementale : 39,50 ha).

La présence d'un important cheptel bovin sur le secteur explique la production d'une quantité élevée de déjections animales valorisées majoritairement sous forme de fumiers sur les cultures. A cela s'ajoute une fertilisation minérale qui s'avère importante pour les prairies temporaires (130 kg N/ha) et les céréales (100kg N/ha). A titre d'exemple, la répartition de la fertilisation azotée par grands types de culture pour l'année 1999 est reportée dans le tableau 6.

Cultures	Fertilisation totale en kg d'azote/ha
Céréales	132 (± 85)
Maïs	255 (± 110)
Prairies	137 (± 88)

Tableau 6- Fertilisation totale des cultures sur le bassin versant du Yar en 1999 (Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999)

Les besoins des plantes étant estimés à 180 kg de N/ha pour les prairies et 160 kg de N/ha, la fertilisation est excessive pour les cultures de maïs qui, lorsqu'elles sont suivies d'un sol nu l'hiver, présentent des risques importants de lessivage. Les prairies, avec souvent plus de 2 UGB/ha (Unité Gros Bétail), sont régulièrement surpâturées, entraînant des apports d'azote non maîtrisables et mal répartis à la surface des parcelles, susceptibles là encore de favoriser les lessivages d'azote durant l'hiver.

Dans ce contexte de production agricole et face à la nécessité de réduire le phénomène d'eutrophisation, le suivi de la couverture hivernale des sols apparaît donc très pertinent d'un point de vue environnemental. Ainsi, la présence de végétation sur les parcelles agricoles et son évolution dans le temps sont susceptibles d'influer sur la qualité de l'eau et par conséquent sur les marées vertes qui envahissent régulièrement la Baie de Lannion. La réduction des surfaces en sols nus l'hiver est une des mesures inscrites dans différents programmes d'action engagés depuis les années 1990 sur le bassin versant afin de réduire le phénomène d'eutrophisation. (Programme « Lutte contre les marées vertes » du CG22, le PMPOA, les CTE...) Son application se traduit par des modifications d'occupation des sols, notamment par l'implantation d'intercultures et des changements de modes de production

(extensification avec augmentation des prairies, conversion à l'agriculture biologique...). Les organismes à l'initiative de ces programmes et/ou chargés de leur application (Conseil Général, Communauté de Communes, Chambre d'agriculture...) ont ainsi exprimé le besoin de disposer d'un outil d'évaluation de leurs actions passées et de programmation pour les actions à venir. La modélisation prédictive des trajectoires spatio-temporelles de la couverture hivernale des sols contribue ainsi à répondre à cette attente. D'ailleurs, un partenariat a été développé avec ces organismes, afin d'échanger, de valider des données et des résultats, et d'apporter une expertise de part et d'autre sur cette problématique.

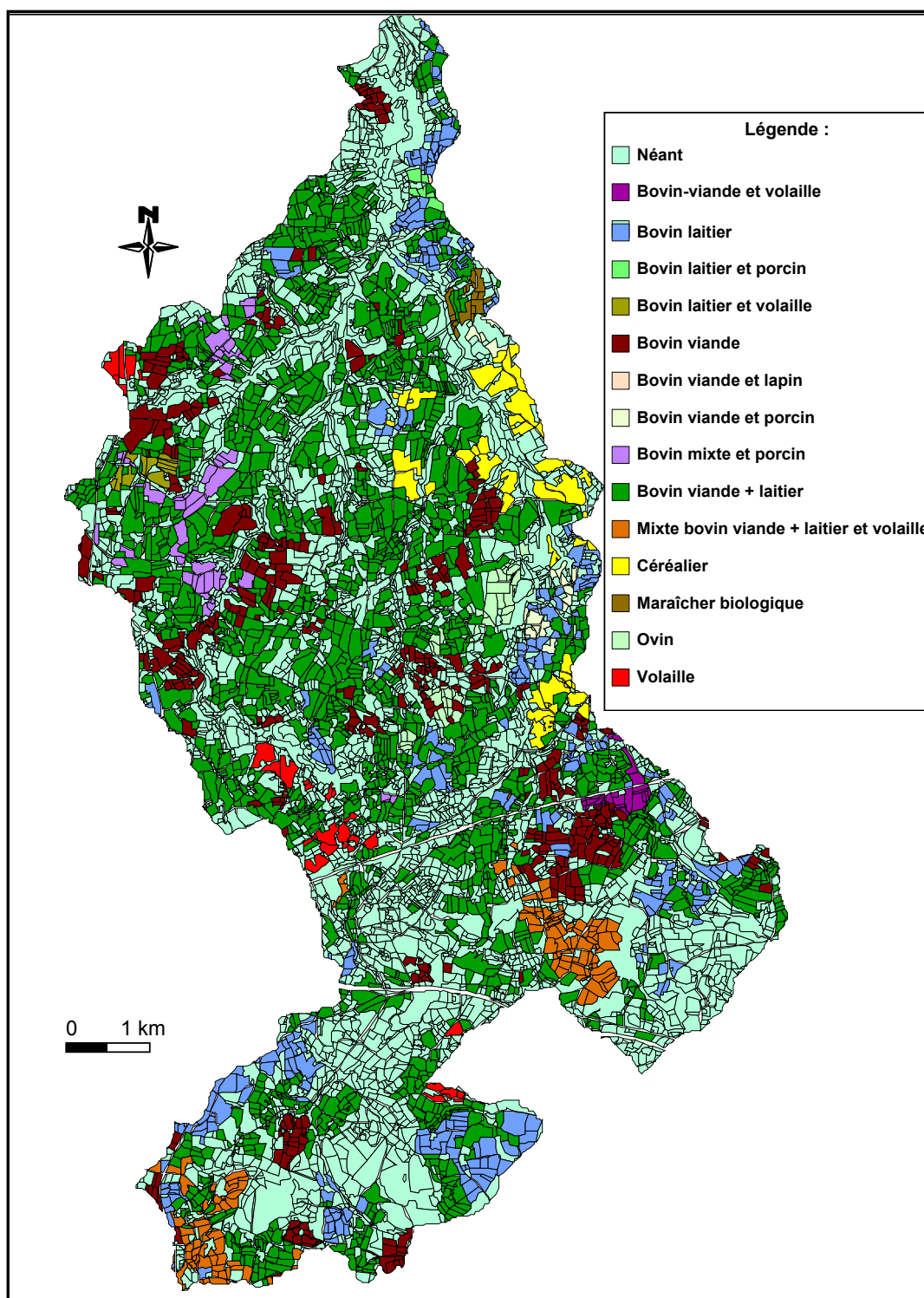


Figure 17 - Systèmes de production sur le bassin versant du Yar (Etat en 1998, Conseil Général des Côtes d'Armor)

2.2.3. Les données

2.2.3.1. La base de données

Les données utilisées dans le cadre de ces recherches sont très variées. Elles comprennent une série multitemporelle d'images de télédétection, des données vectorielles sur les limites administratives, les structures paysagères, les activités socio-économiques ...ainsi que de nombreuses enquêtes effectuées sur le terrain et auprès des exploitations agricoles. Notons qu'une bonne partie des données vectorielles proviennent de la base du Conseil Général des Côtes d'Armor (Tableaux 7 et 8), L'ensemble de ces données est traitée sous SIG. De nombreuses enquêtes agricoles ont été effectuées chez les exploitants agricoles du bassin versant du Yar et de nombreuses mesures ont été relevées sur le terrain, afin de traiter les données images. Par ailleurs, ces recherches engagées sur le bassin versant du Yar sont effectuées en partenariat avec la Communauté d'Agglomération de Lannion, la Chambre d'Agriculture des Côtes d'Armor, et le Conseil Général des Côtes d'Armor sur la base d'une Convention d'échange de données, de réunions de concertation régulières entre les différents collaborateurs et de restitution de travaux. Ce partenariat est une condition nécessaire dans le cadre une approche modélisatrice de type prédictif portant sur l'usage des sols.

<i>Données de type spatial</i>	
Limites bassin-versant	- Couche vectorielle (polygone) dérivée d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)
Limites sous bassins-versants	- Couche vectorielle (polygones) dérivée d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT)
Limites communales	- Couche vectorielle (polygones)
Limites parcellaires	- Couches vectorielles (polygones) digitalisées à partir de photographies aériennes et remises régulièrement à jour à partir d'images satellitaires
Réseau hydrographique	- Couche vectorielle (lignes) dérivée du SCAN 25 de l'IGN
Occupation/Utilisation du sol de 1996 à 2004	- Couches vectorielles (polygones) de l'occupation et l'utilisation des sols de l'hiver 1996/97 à l'hiver 2003/04 dérivées des images satellitaires et d'un orthophotoplan (1998)
<i>Données de type socio-économique</i>	
Système de production agricole	Défini par exploitation et associé au parcellaire agricole
Type d'exploitation	Défini par exploitation et associé au parcellaire agricole
Données agricoles spécifiques	- Quota laitier/SAU (pour les exploitations de type bovin-laitier) - Unités Gros Bétail/Ha - SFP (Surface fourragère Principale)

Tableau 7– Données utilisées dans le cadre du processus de modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar (Hors images satellitaires, Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999)

Bassin versant du Yar	Date	Capteur	Contrôles terrain associés
	29/12/1996	SPOT XS	OUI
	15/08/1997	SPOT XS	OUI
	13/12/1997	IRS-LISS	OUI
	10/08/1998	SPOT XS	OUI
	06/01/1999	SPOT Xi	OUI
	24/07/1999	SPOT XS	OUI
	08/03/2000	IRS –LISS	OUI
	18/06/2000	SPOT-Xi	OUI
	27/01/2001	SPOT XS	OUI
	12/05/2001	SPOT-Xi	OUI
	28/09/2001	SPOT-Xi	OUI
	17/12/2001	SPOT-Xi	OUI
	13/09/2002	SPOT-Xi	OUI
	24/01/2003	SPOT 5	OUI

Tableau 8- Images satellitaires acquises et contrôles terrain associés

L'acquisition des images satellitaires (scènes d'archives ou programmées) a été effectuée en parallèle sur le bassin versant du Yar et les autres sites d'étude dans le cadre du programme ISIS du CNES, au titre des Programmes National de Télédétection Spatiale et du Programme Environnement Vies et Sociétés du CNRS. Au moins deux images, voire trois, ont été acquises par année sur la période 1996-2004 (Au minimum une scène d'hiver, une scène d'été, et parfois une scène de printemps).

2.2.3.2. Les prétraitements des données image

Avant la phase de traitement des données permettant de dégager les trajectoires d'évolution d'occupation du sol étudiées, l'ensemble de la série d'images satellitaires acquises sur le bassin versant du Yar a fait l'objet d'une phase de pré-traitements, indispensables dans le cadre d'études multitemporelles, la qualité de ces corrections conditionnant fortement la précision des résultats.

- Les corrections radiométriques

Les corrections atmosphériques sont indispensables dès que les traitements des images satellites ont pour objectif :

- d'accéder à des valeurs physiques de réflectance de surface ;
- d'effectuer des comparaisons multidates entre des images provenant du même capteur ou de satellites différents ;
- d'assurer la reproductibilité de méthodes d'identification ou de classifications de surface, sans devoir reprendre l'analyse d'échantillons pris sur l'image à traiter (Kergomard, 2000).

La diffusion, l'absorption et la réfraction sont les trois principales sources de dégradation du signal provenant de l'atmosphère. Il est possible de corriger partiellement ces effets à partir de modèles de corrections atmosphériques. Cependant il faut noter que ces dernières restent encore approximatives car elles reposent sur des hypothèses simplificatrices. Ainsi, l'usage du logiciel 5S (Simulation du Signal Satellite dans le Spectre Solaire) développé au laboratoire d'optique atmosphérique de Villeneuve d'Ascq (Tanré et al., 1990) conduit à une évaluation des effets de l'atmosphère sur l'image traitée plutôt qu'à une correction effective. Cependant, l'objectif de cette étude étant de comparer des scènes prises par des capteurs différents et à des dates différentes, il est indispensable que toutes les scènes soient normalisées pour que les données soient comparables. Nous avons donc décidé d'appliquer le Modèle 5S, en raison de sa relative simplicité d'application et de sa disponibilité. Les étapes des corrections atmosphériques qui ont été appliquées sur les images sont présentées sur la figure 18.

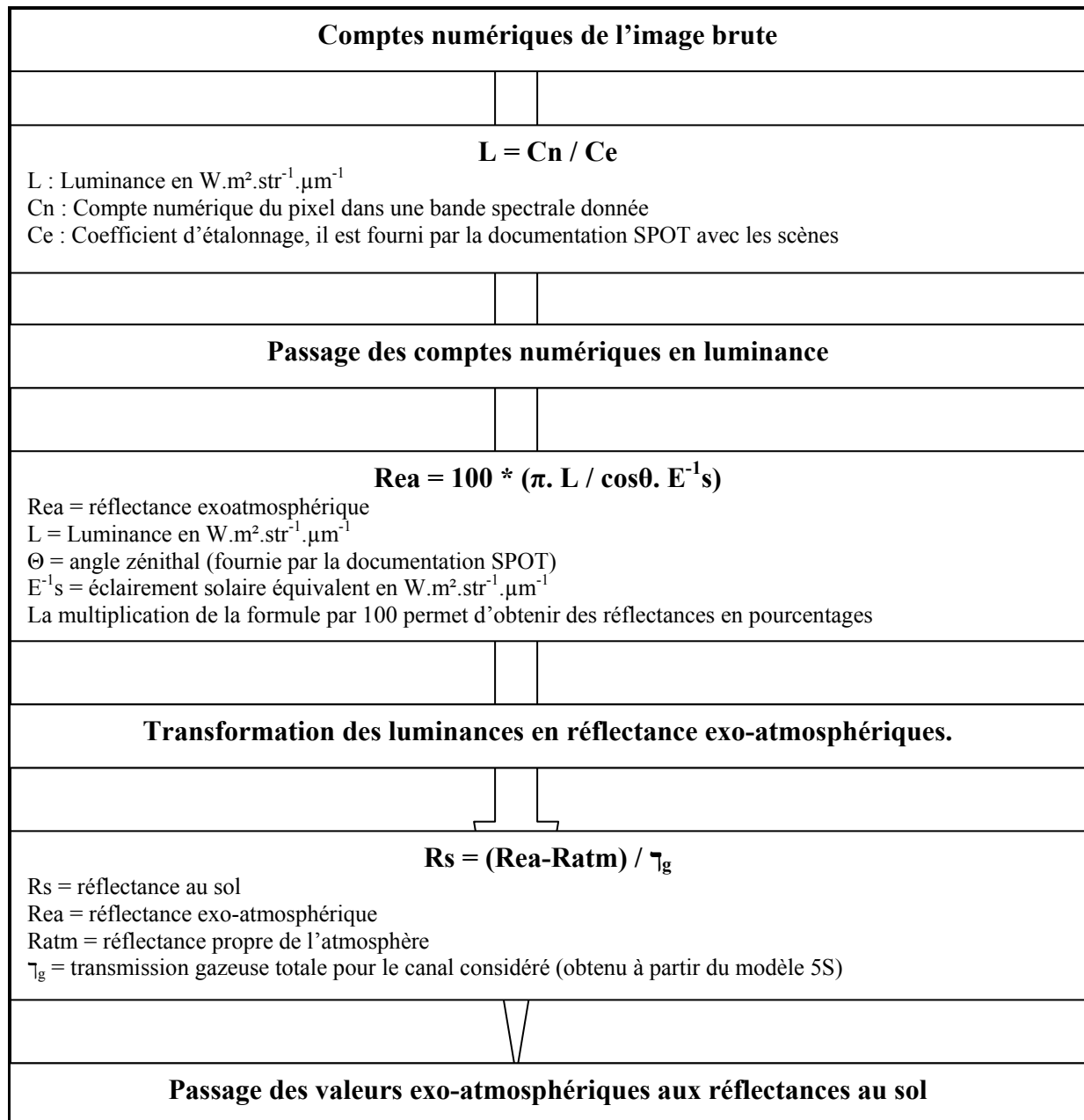


Figure 18- Processus des traitements radiométriques avec le modèle 5S

- Les corrections géométriques

La série d'images corrigée radiométriquement a ensuite été rectifiée géométriquement avec une méthode polynomiale standard. Une dizaine de points d'appui en moyenne ont été sélectionnés par scène satellitaire, et le rééchantillonnage a été effectué par la méthode du plus proche voisin. Les images ont été géoréférencées en Lambert II étendu conforme à partir du SCAN 25 de l'IGN. La précision des images rectifiées géométriquement est inférieure au pixel pour toutes les images, ce qui est satisfaisant et permet de passer aux étapes ultérieures de traitement des images.

2.3. Application de la théorie des évidences pour la modélisation de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar

L'approche adoptée pour prédire l'évolution de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar est de type approximatif ou incertain, ce qui nécessite l'élaboration et la mise en œuvre d'un modèle expert. Toute modélisation prédictive de l'évolution de l'occupation des sols requiert d'une part la connaissance des trajectoires spatio-temporelles passées de l'occupation des sols, l'identification des facteurs qui ont motivé ces changements ainsi que la détermination de leur poids relatif, et enfin des connaissances expertes permettant d'émettre des hypothèses vraisemblables sur le devenir des territoires étudiés en fonction de paramètres socio-économiques, législatifs, climatiques... Les étapes de la modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols sont donc structurées selon ce cheminement (Figure 19).

En conséquence, pour l'application qui a été effectuée sur le bassin versant du Yar, les changements passés sont d'abord déterminés essentiellement à partir d'une série multitemporelle d'images satellitaires, puis les facteurs qui expliquent l'historique de ces changements sont identifiés à partir de connaissances expert, validés et hiérarchisés qualitativement puis quantitativement de façon à déterminer les facteurs les plus significatifs dans les changements d'occupation du sol observés. La dernière étape consiste à intégrer les sources d'informations décrivant les facteurs susceptibles de contribuer à l'évolution des modes d'occupation hivernaux des sols dans le modèle de Dempster-Shafer, afin de produire une prédiction à court terme – pour l'hiver suivant – de l'occupation des parcelles agricoles du bassin versant. L'incertitude liée à l'état incomplet et imprécis des connaissances et des données, tant pour produire l'historique des changements passés, que pour déterminer et quantifier les facteurs de ces changements passés et à venir, est prise en compte au niveau de l'affectation des jeux de masse aux sources d'information intégrées dans le modèle. L'incertitude est également attachée aux résultats à travers la production de cartes de degré de

confiance sur les décisions prises. Ainsi, les résultats obtenus sont analysés en prenant en considération le niveau d'incertitude qui leur est associé.

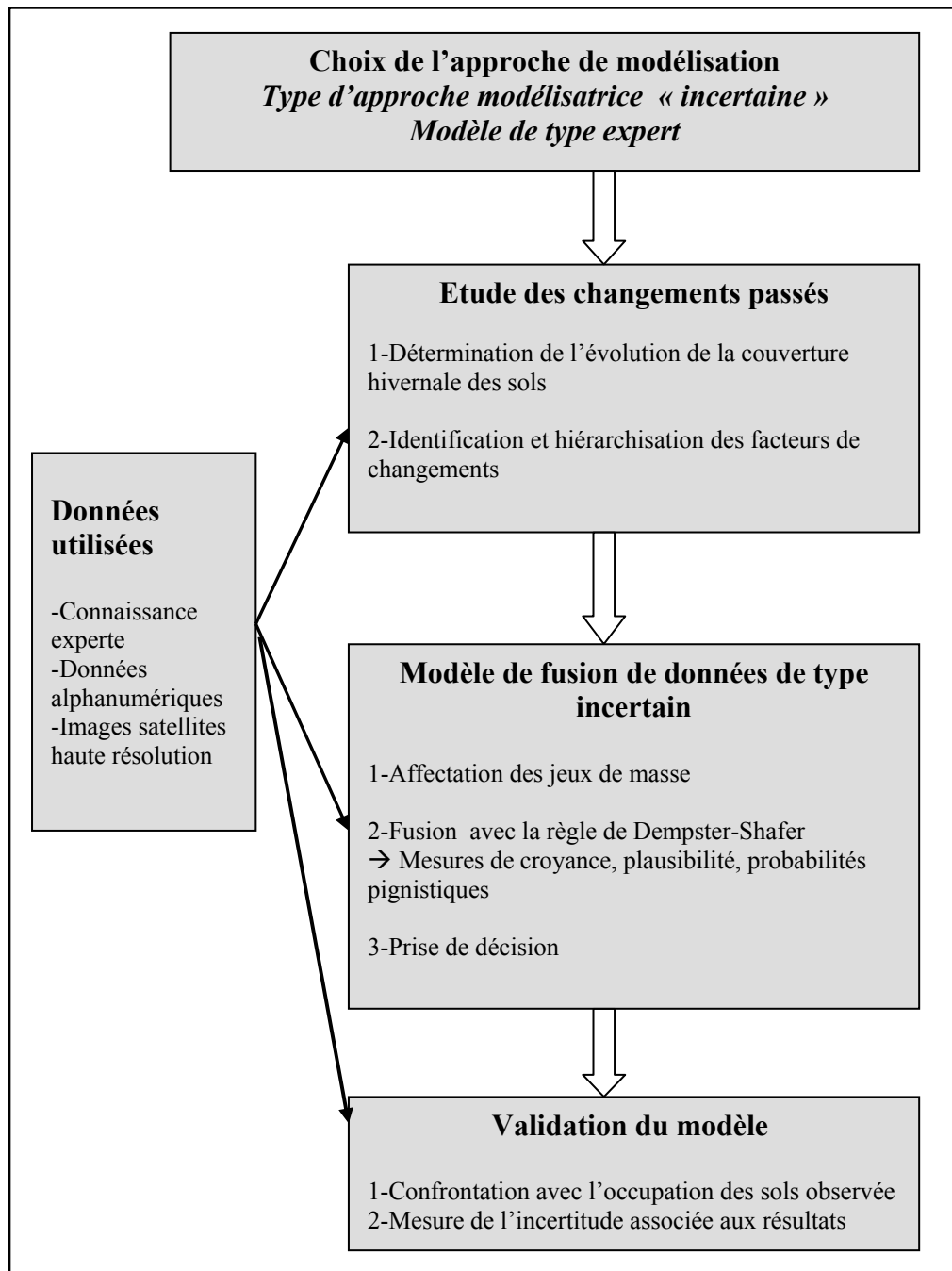


Figure 19- Méthodologie du processus de modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols appliquée sur le bassin du Yar

2.3.1. Détermination de la couverture hivernale des sols

La télédétection est couramment utilisée pour déterminer l'occupation des sols, mais curieusement assez peu d'études portent exclusivement sur la couverture hivernale des sols. Un des principaux freins à l'utilisation de ces données réside dans la faible répétition d'acquisition d'images exploitables à cette saison en raison de la fréquence de la couverture nuageuse, et dans la résolution spatiale des capteurs les plus couramment utilisés en télédétection, en moyenne de l'ordre de 20m, qui limite, dans certains cas, fortement la précision des résultats (Hubert-Moy *et al.*, 2001).

D'une façon générale, deux niveaux d'identification de la couverture hivernale des sols par télédétection peuvent être distingués selon les objectifs poursuivis :

- Une identification binaire de type « sols nus » et « sols couverts » utilisée dans le cadre de suivis de successions culturales annuelles (Ex. : programme européen MARS, Monitoring of Agriculture with Remote Sensing), ou plus rarement dans des études portant exclusivement sur les sols sans couverture végétale l'hiver.

- Une identification plus détaillée de la couverture des sols en relation avec des recherches environnementales. La présence de végétation et l'état des sols des parcelles agricoles sont dans ce cas plus finement décrits pour anticiper par exemple le développement de la végétation et désigner sur des sites stratégiques à un stade précoce, les cultures économiquement importantes implantées et les surfaces non cultivées (friches, jachères, sols nus...) avec un objectif de prévision des récoltes. La définition de taux de couvertures des sols peut par ailleurs, viser à déterminer les zones contributives au ruissellement et aggravant les épisodes de crues (Coulombe-Simoneau *et al.*, 2001 ; Delahaye, 2002).

Les deux types d'identification sont abordés dans ce travail car ils apportent tous les deux des informations significatives dans la compréhension des changements d'occupation du sol de la couverture hivernale. Le premier type d'identification permet d'inscrire et d'analyser ces changements dans le cadre des successions culturales annuelles ; le deuxième, à travers une mesure des taux de couverture offre la possibilité d'analyser entre les hivers, la densité et la nature des changements, et à travers une identification précise de la nature de la végétation permet d'appréhender la question de la détermination du type d'interculture implanté sur les parcelles.

Ils seront abordés successivement à travers une partie consacrée à la détermination du taux de couverture des sols -qui comprend la désignation des deux classes « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » et une étude plus détaillée des classes de densité de la végétation- et une partie dédiée à la définition qualitative du couvert végétal qui vise à identifier les intercultures.

2.3.1.1. Taux de couverture des sols

Pour mesurer à un instant précis les taux de couverture hivernale des sols avec des images multispectrales de type SPOT, deux types de méthodes dominent : les méthodes fondées sur le démixage des pixels et les méthodes reposant sur les indices de végétation.

-Les méthodes fondées sur le dé-mélangeage des pixels (ou encore démixage sub-pixel) sont utilisées pour déterminer au sein de bassins versants les surfaces nues ou partiellement couvertes par la végétation (Adams *et al.*, 1986 ; Raffy, 1994). L'objectif recherché est d'améliorer, à partir d'images dont la résolution spatiale est de 20-30 m, l'identification de surfaces dont la proportion de sols nus est non négligeable, en général supérieure à 40%. En effet, assez peu de pixels sur une scène Landsat TM ou SPOT représentent des signatures spectrales « pures », correspondant à 100% de végétation ou 100% de sols nus, la plupart reflétant une combinaison de ces deux composantes. Chaque pixel de l'image est alors transformé en une combinaison linéaire selon un mélange estimé de signatures « pures » déterminé à partir de mesures effectuées sur le terrain (Smith, 1990; Ustin *et al.*, 1993). Cependant, ces méthodes rencontrent des limites liées (1) à la résolution spectrale des capteurs multispectraux qui n'offrent pas la capacité de discriminer correctement les sols nus, les roches à nus et la végétation non chlorophyllienne, tandis que la différenciation de ces différents types de surfaces est réalisable dans le proche infrarouge à partir d'images hyperspectrales (Ustin *et al.*, 1995) (2) à la diversité des situations rencontrées sur le terrain, notamment à la présence de différents types de sols qui augmentent le nombre de signatures spectrales « pures » à prendre en compte dans le processus de démixage.

-Les méthodes qui reposent sur les indices de végétation incluent plusieurs techniques, les indices de végétation étant obtenus par diverses opérations arithmétiques à partir de l'information radiométrique contenue dans les bandes spectrales des images télédétection, en particulier dans le rouge et le proche infrarouge (Richardson et Wiegand, 1977 ; Huete, 1988). Ils sont reliés à des variables d'état des couverts, telles que la quantité de biomasse aérienne du couvert, l'indice foliaire (LAI, Leaf Area Index), et le taux de couverture du sol (Tucker, 1979 ; Jackson et Huete, 1991). Toutefois, de très nombreuses études ont montré qu'ils sont également sensibles à des paramètres internes au couvert végétal tel que sa structure et à des paramètres externes au couvert, tels que l'atmosphère, l'angle solaire ou le sol (Price, 1987). Parmi la multitude d'indices de végétation existant, les ratios calculés à partir des bandes rouge et proche infrarouge, parmi lesquels le NDVI qui est l'indice le plus appliqué, sont les indices les plus utilisés pour séparer les surfaces végétales des surfaces correspondant aux sols nus. Dans la majeure partie des cas, l'affectation des pixels à la classe « sols nus » s'effectue en fixant un seuil à partir de l'affichage de l'histogramme de l'indice sélectionné. Ainsi, les

pixels ne correspondant pas à la végétation chlorophyllienne sont en général assimilés à des sols nus.

Toutefois, la détermination d'une classe correspondant aux sols nus à très peu couverts à partir de cette approche soulève principalement deux questions : (1) Quel est l'impact du choix de l'indice de végétation sur les résultats ? (2) Quel est l'impact du seuillage de l'indice sur les résultats ?

Toutes les images satellitaires d'hiver acquises sur le bassin versant du Yar sur la période 1996-2003 ont fait l'objet de classifications à partir de plusieurs indices de végétation. A titre d'exemple, le seuillage de l'indice NDVI calculé à partir de l'image du 24/01/2001 montre que les sols nus à peu couverts couvrent 17% de la surface du bassin versant et sont essentiellement répartis sur la partie aval du bassin versant (Figure 20). La comparaison des classifications effectuées sur le bassin versant du Yar à partir du seuillage de plusieurs indices avec un même échantillonnage –important dans ce cas- a montré que le choix de l'indice a un impact faible sur les résultats, de l'ordre d'une dizaine d'hectares sur la SAU du bassin versant. Ainsi on obtient 1023 ha en sols nus à peu couverts et 2536 ha en sols couverts pour l'indice de végétation NDVI ; 1014 ha en sols nus à peu couverts et 2546 ha pour le TSAVI. Cela met en évidence le fait que la taille et la qualité de l'échantillonnage influencent probablement davantage les résultats que le choix de l'indice lui-même. D'ailleurs, les conséquences de légères modifications du seuillage sur l'évaluation des surfaces occupées par la classe « Sols nus à peu couverts » sont notables (Figure 21), influent également assez sensiblement sur les résultats, renforçant ainsi cette hypothèse. En conséquence, cela montre une fois de plus -s'il en était besoin- que les contrôles effectués sur le terrain sont particulièrement importants et doivent être réalisés avec soin.

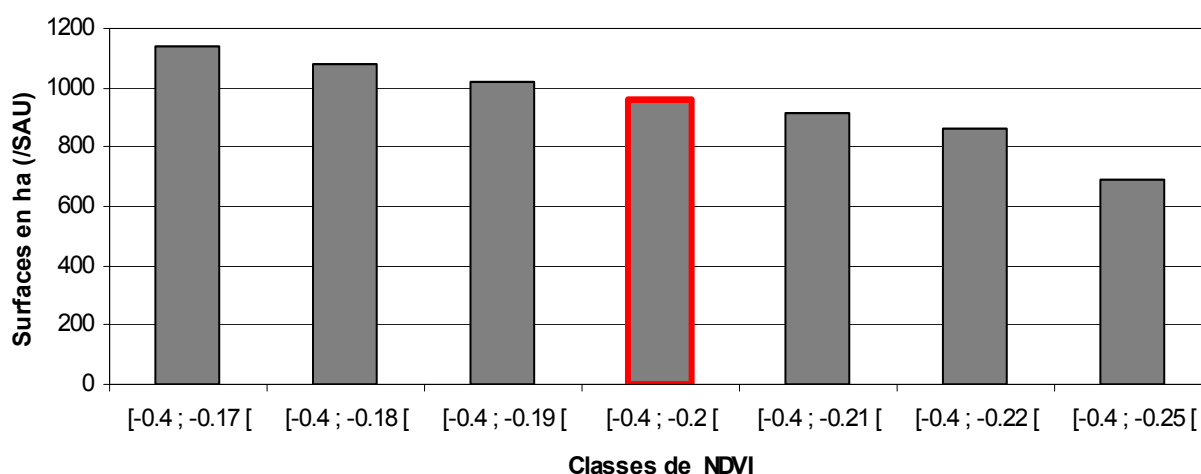


Figure 21- Evaluation des surfaces en sols nus à très peu couverts en fonction du seuillage de l'indice NDVI (SAU Bassin versant du YAR, image SPOT 5 du 24/01/2003) ; La classe entourée de rouge est la classe référence (Seuil déterminé en fonction des parcelles tests <10% de couvert végétal).

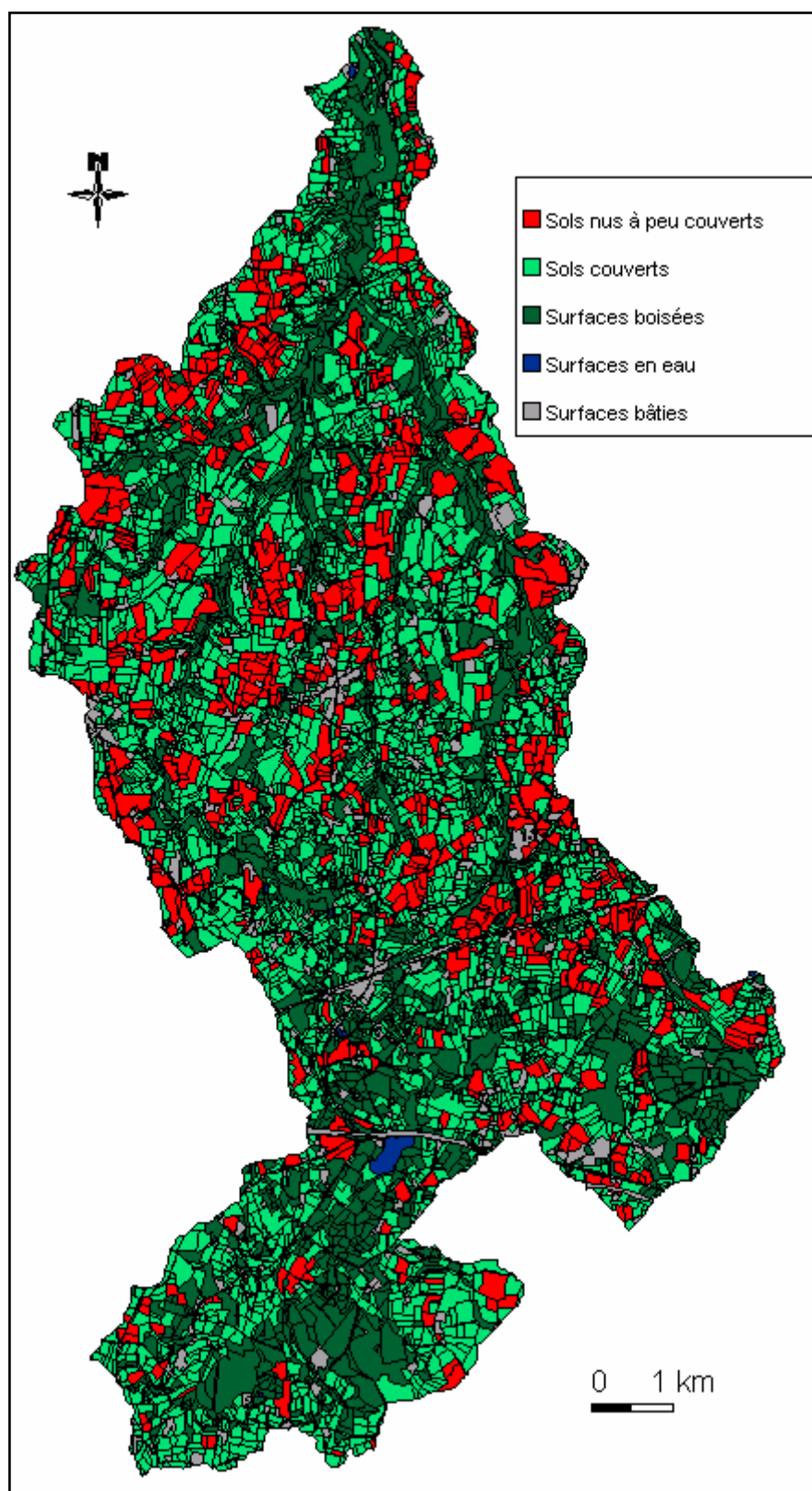


Figure 20- Seuillage du NDVI sur le bassin versant du Yar en janvier 2001

Les images à haute résolution spatiale permettent d'effectuer grossièrement la discrimination entre des sols nus à très peu couverts et des sols couverts par la végétation. En revanche, une détermination précise des densités de couverts et une identification des végétaux implantés ne sont pas réalisables avec des données d'une précision décimétrique. Face aux limites des données à haute résolution spatiale, une évaluation des images à très haute résolution spatiale, d'ordre métrique, a été entreprise.

Un indice TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index), calculé à partir d'une image SPOT 5 de janvier 2003, programmée avec une résolution de 5 m en mode panchromatique et 10 m en mode multispectral, a permis de montrer l'intérêt d'une amélioration de la résolution spatiale pour l'estimation de la densité du couvert végétal sur les parcelles agricole (Figure 22). A cette échelle spatiale, l'influence des sols sur les réponses spectrales peut s'avérer importante et le TSAVI en introduisant des paramètres dérivés de la droite des sols (Baret *et al.*, 1989 ; Baret et Guyot, 1991) permet de corriger de l'influence du sol. La formule est la suivante:

$$\bullet \text{ TSAVI} = s(R_{\text{PIR}} - s \times R_{\text{Rouge}} - a) / (a \times R_{\text{PIR}} + R_{\text{Rouge}} - a \times s + 0,08 \times (1 + s \times s))$$

- Où s est la pente de la droite des sols dans le plan spectral rouge-proche infrarouge,
- a l'ordonnée à l'origine de la droite des sols,
- R_{Rouge} la réflectance dans le rouge,
- R_{PIR} la réflectance dans le proche infrarouge.

La corrélation entre le TSAVI et la densité du couvert, calculée à partir d'un échantillonnage effectué sur 261 parcelles, montre une très bonne corrélation, de 0,91 dans ce cas (Figure 23). L'analyse de la densité de la couverture végétale en fonction des types de couverts au sein des parcelles montre qu'à la date de l'image la densité est variable, quelque soit le type de couvert présent, à l'exception du colza qui est totalement couvrant (Figure 24). Ceci met en évidence des hétérogénéités intraparcellaires et interparcellaires importantes pour chaque type de couvert en fonction des pratiques agricoles, et permet également d'observer que la densité n'est en aucun cas ici le paramètre à partir duquel l'identification du couvert peut être réalisée. Ces résultats montrent l'intérêt de la très haute résolution spatiale pour la détermination des taux de couverture des sols.

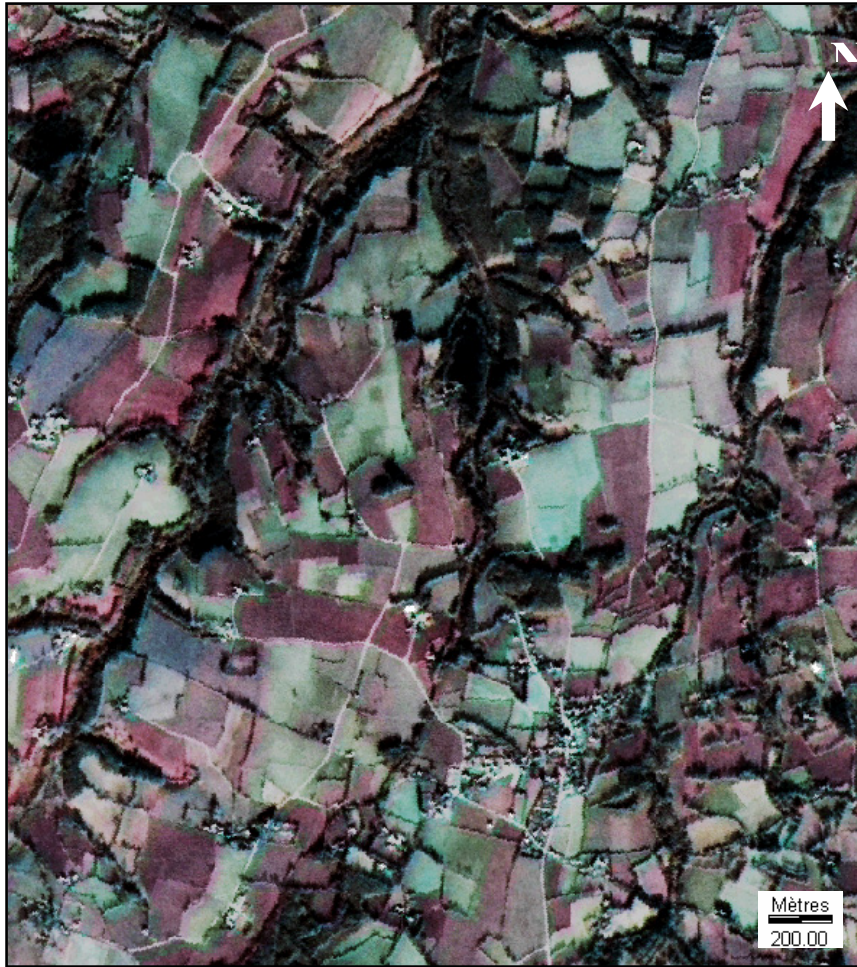


Figure 22- Extrait de l'image SPOT 5 du 24/01/2003 (Fusion P. à 5m + Xi à 10m)

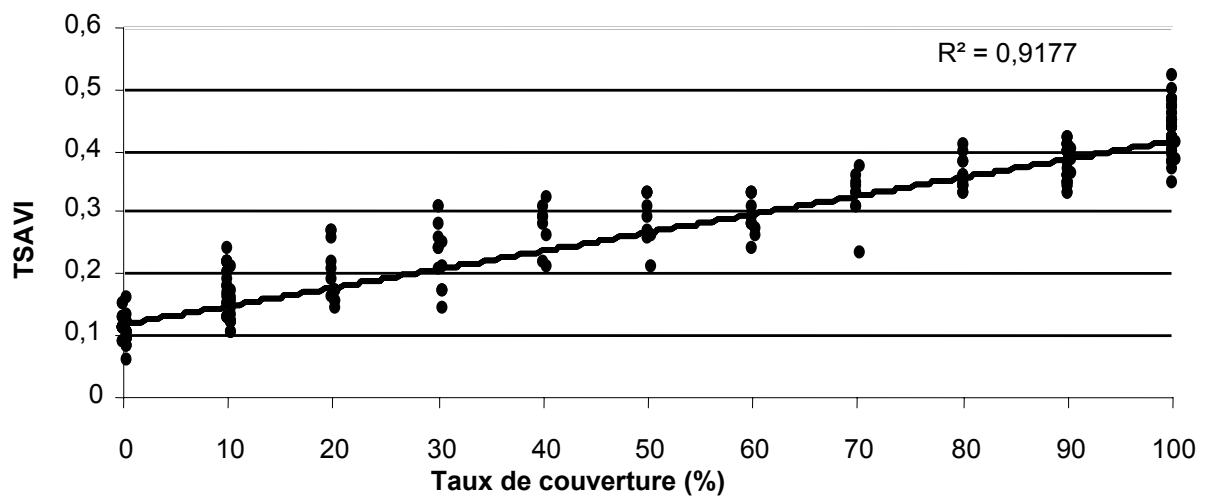


Figure 23 - Relation entre le TSAVI calculé à partir de l'image SPOT du 24/01/2003 et le taux de couverture du sol par la végétation observée sur le terrain

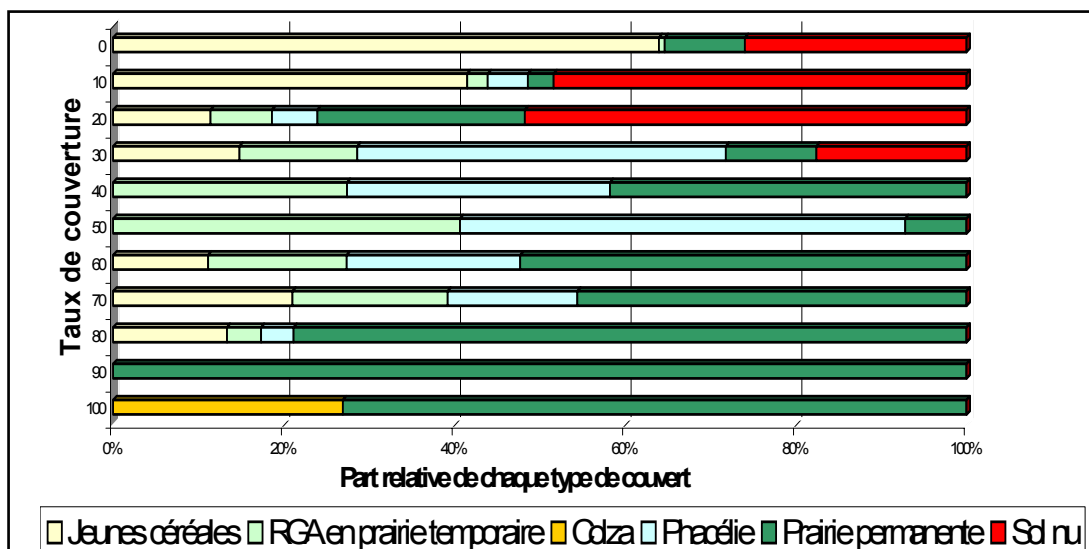


Figure 24- Part relative de chaque type de couvert végétal hivernal en fonction du taux de couverture du sol par la végétation

2.3.1.2. L'identification des intercultures

L'identification des couverts végétaux hivernaux est une entreprise particulièrement délicate, étant donnée la proximité de leurs signatures spectrales dans le cas de données de type SPOT, à la résolution spectrale assez limitée (Figure 27). D'après les études comparatives menées à partir d'images SPOT sur le bassin versant du Yar (Hubert-Moy *et al.*, 2001), la classification par maximum de vraisemblance semble bien adaptée pour dégager les principales classes d'occupation des sols, même s'il apparaît que pour des paysages assez peu ouverts des classifications de type contextuel, c'est à dire prenant en compte le voisinage des pixels lors du processus de classification, donnent de meilleurs résultats. Cependant, considérant le ratio coût/efficacité et le nombre d'images à traiter, il est parfois préférable d'utiliser le maximum de vraisemblance qui reste beaucoup plus rapide à mettre en œuvre que des classifications de type contextuel. Les classifications des images d'hiver à haute résolution n'ont cependant pas permis d'identifier les types de couverts végétaux en place à la date de l'image, et seules les deux classes « Sols nus à peu couverts » (< ou égale à 10%) et « Sols couverts » ont pu être discriminées.

Ainsi, les images à haute résolution (SPOT, Landsat, IRS-LISS), d'une précision décimétrique au mieux, ne permettent pas une identification des nombreux types de végétation inclus dans la classe « sols couverts (prairie, phacélie, moutarde, colza,...) ». Pour tenter d'identifier le type de végétation présent sur les parcelles en hiver, l'image SPOT 5 du 24 janvier 2003 d'une résolution de 10 mètres en multispectral et 5 mètres dans le panchromatique est évaluée. L'analyse des signatures spectrales des différents types de couverts montre que des groupes de couverts peuvent être dégagés, à défaut de pouvoir

identifier chaque type de couvert (Figure 25). La méthodologie choisie pour discriminer les couverts consiste à utiliser les taux de couverture végétale des sols déjà définis à partir de cette image et les mettre en relation avec les différents types de couverts présents sur les parcelles, discriminés par une classification par maximum de vraisemblance.

Ainsi, si les scores globaux des différentes classifications appliquées sur cette image sont très faibles, variant entre 29 et 37%, l'analyse du score de la meilleure classification obtenue par densité de couverts montre que les résultats de la classification dépendent de la densité des différents couverts (Figure 26). En conséquence, en fonction de la connaissance du niveau de séparabilité des différents types de couverts en fonction de leur densité, du calendrier agricole et du contexte météorologique de l'année, une stratégie de programmation de l'acquisition des scènes satellitaires pourrait être définies, afin d'identifier au mieux les types d'intercultures implantés sur les bassins versants.

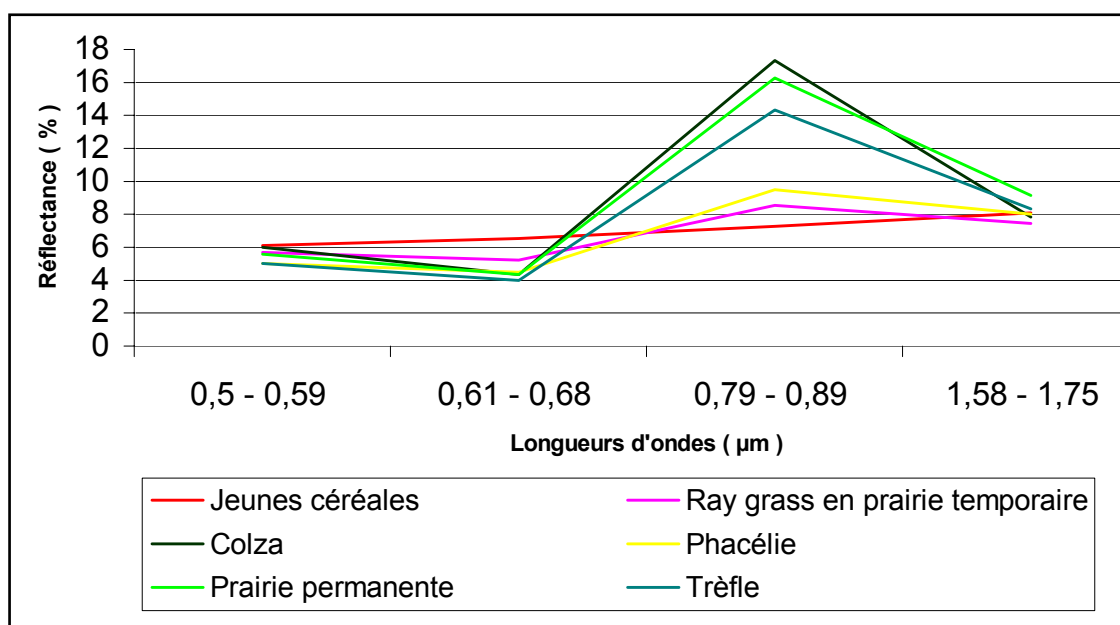


Figure 25 - Signatures spectrales de différents types de couverts hivernaux à partir d'une image SPOT 5 (Bassin versant du Yar, 24/01/2003)

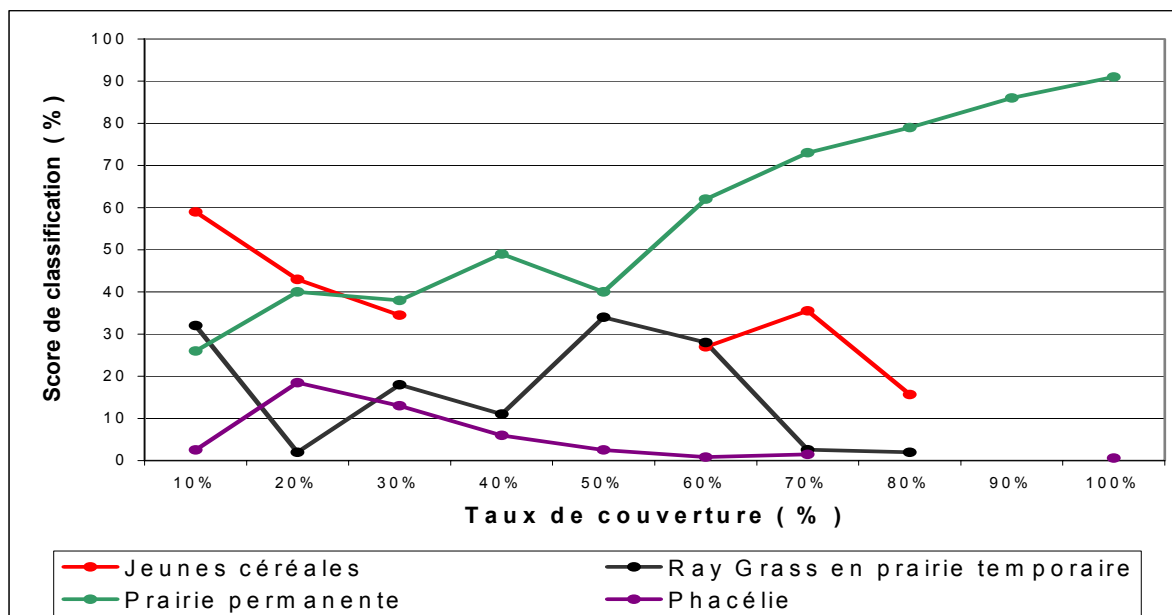


Figure 26- Scores de classifications de différents couverts hivernaux en fonction de la densité de couvert végétal

Dans la mesure où seule une scène SPOT à très haute résolution est disponible dans la série multitemporelle utilisée, la détermination de la couverture hivernale des sols se limite donc, dans le cadre de l'application sur le bassin versant du Yar à deux classes d'occupation et d'utilisation du sol : la classe « sols couverts » pour laquelle, les caractéristiques actuelles des satellites optique ne permettent pas l'identification du type du couvert ; la classe « sols nus à peu couverts » qui peut par contre, dans le cadre d'une analyse des successions culturales, être affinée en 2 classes d'utilisation du sol : « sols nus véritables », « sols couverts par une céréale d'hiver ».

2.3.2. Les changements de la couverture hivernale des sols

De nombreux travaux de recherches concernant la détection des changements actuels des surfaces terrestres à partir de données de télédétection ont été effectués depuis une vingtaine d'années (Singh, 1989 ; Coppin et Bauer, 1996 ; Vogelmann, 1988 ; Pilon *et al.*, 1988 ; Sader *et al.*, 1991 ; Roy *et al.*, 1991 ; Alwashe et Bokhari, 1993 ; Coppin et Bauer, 1994 ; Jha et Unni, 1994 ; Muchoney et Haack, 1994 ; Ridd et Liu, 1998 ; Foody et Boyd, 1999). Cependant, selon les indices de changement retenus et les méthodes de détection appliquées, les résultats obtenus montrent des différences qui peuvent être significatives tant au niveau quantitatif sur l'importance des modifications intervenues sur une période donnée (Mas, 1999 ; Macleod et Congalton, 1998), qu'au niveau qualitatif sur les types de changements observés (Smith *et al.*, 2003 ; Fung et Ledrew, 1988 ; Lyon *et al.*, 1998). Par

ailleurs, pour une méthode donnée, si l'on change d'application et de données, la qualité des résultats obtenus varie également, parfois de façon significative. De plus, l'introduction d'autres sources d'information que la télédétection dans le processus de détection du changement a également un impact sur la qualité des résultats (Zhang *et al.*, 2002). En conséquence, il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de détection du changement qui soit réellement générique, ou au moins facilement transposable d'une application à une autre.

Dans le cadre de ces recherches, où le nombre d'images à traiter est important, deux méthodes ont été privilégiées, une analyse exploitant les caractéristiques spectrales des images (vecteurs de changements) et une analyse classique de croisement de classification.

2.3.2.1. Analyse à partir des vecteurs de changement

Pour analyser les changements de couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar, la méthode dénommée « change vector analysis » (analyse par vecteur de changement), proposée par Malila en 1980 a été appliquée (Corgne *et al.*, 2002). Cette technique a été utilisée à plusieurs reprises pour des études de changement d'occupation et d'utilisation du sol. Lambin et Strahler (1994) et plus récemment Johnson et Kasischke (1998) l'ont utilisée pour une analyse multi-temporelle de l'évolution de l'occupation du sol à partir d'images NOAA-AVHRR en Afrique.

La méthode des vecteurs de changement est une méthode basée sur la comparaison des mesures radiométriques de différents canaux ou d'indices de végétation pour analyser les mutations de l'occupation du sol. La mesure des changements radiométriques se fait par la soustraction normalisée de deux canaux de deux dates différentes sur le même espace géographique (Figure 27). Cette opération permet de dégager deux composantes de changement radiométrique :

- La magnitude du changement obtenue par la distance euclidienne entre les deux mesures radiométriques. La magnitude du changement (M_c) représente l'intensité du changement et quantifie les variations saisonnières ou annuelles des réponses spectrales ou de l'indice de végétation.

- la direction du changement, exprimée par l'angle issu des valeurs radiométriques (Lambin E.F. et Strahler A.H., 1994) indique s'il y eu perte ou gain de végétation entre les deux dates étudiées.

L'intersection et le seuillage de ces deux indicateurs permet de qualifier le changement (gain, perte ou stagnation de la végétation entre deux dates) et de le quantifier (fort, faible ou nul). Par exemple, l'analyse des vecteurs calculés pour les hivers 2000/01 et 2001/02 (Tableau 9) permet de noter que les changements d'occupation du sol entre les deux hivers ne sont pas

importants spatialement ; seuls 1616 ha soit 26% du bassin versant sont concernés par des changements. Parmi ces changements, 826 ha ont connu des gains de végétation et 576 ha des pertes de végétation. 158 ha sont le résultat d'un changement radical de l'utilisation du sol et concernent des parcelles en sols couverts durant l'hiver 2000/01 qui ont évolué en sols nus à très peu couverts en 2001/02.

Classes	Surface (ha)
1: Pas de changement	4484
2: Faible changement avec perte de végétation	103
3: Faible changement avec gain de végétation	301
4: Fort changement avec perte de végétation	392
5: Fort changement avec gain de végétation	367
6: Très fort changement avec perte de végétation	81
7: Très fort changement avec gain de végétation	158

Tableau 9- Estimation des modifications de couverture des sols entre les hivers 2000/2001 et 2001/2002 par l'analyse des vecteurs de changements.

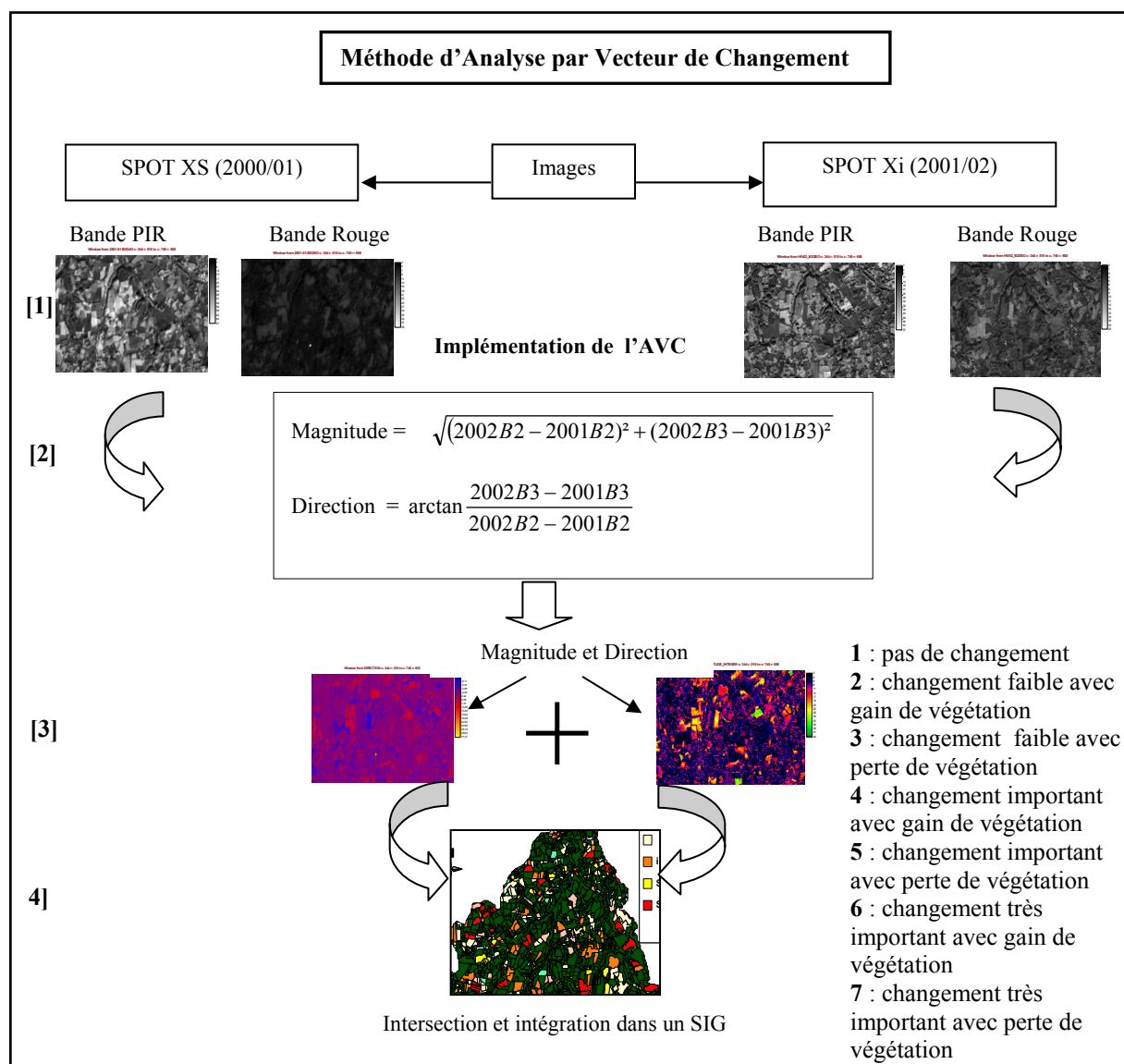


Figure 27- Méthodologie de l'analyse des vecteurs de changements (AVC) calculés entre deux hivers

Une analyse menée entre chaque hiver étudié de 1996 à 2002 (Figure 28) montre que les changements d'occupation de couverture hivernale des sols sont nombreux et que leur intensité entre les hivers peut s'avérer très hétérogène. Ainsi, pour la comparaison effectuée entre l'hiver 1999/98 et 1999/00, aucun changement très important avec gain de végétation n'est détecté, par contre la comparaison des hivers 1999/00 et 2000/01, près de 200 ha sont caractérisés par ce type de changement. Par ailleurs, une grande part des changements concerne de faibles changements de couverture des sols, cela s'explique principalement par les dates d'acquisition des images satellites qui détectent des types de végétation à différents stades phénologiques. Les changements importants avec gain et perte de végétation sont

également très variables au fil des hivers illustrant une forte dynamique locale des changements.

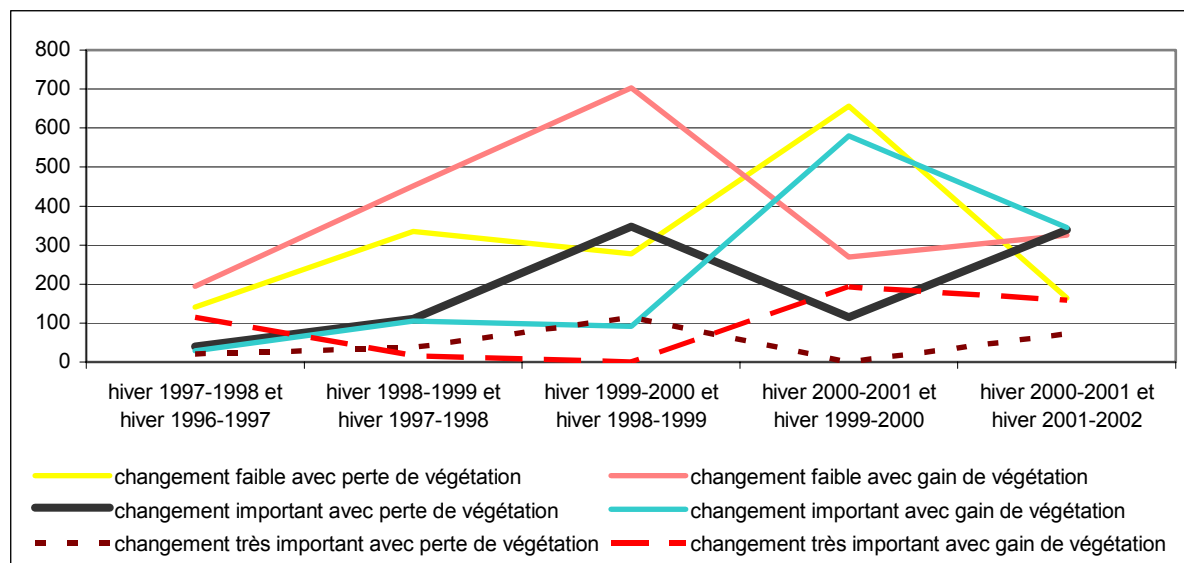


Figure 28- Evolution des niveaux de changement de couverture des sols entre les hivers étudiés

2.3.2.2. Analyse par les rotations culturales

L'ensemble des classifications (hiver-été) réalisées de 1996 à 2003 sont vectorisées et intégrées au sein d'un SIG. Des successions culturales à l'échelle parcellaire peuvent ainsi être établies offrant un complément d'informations intéressant pour la couverture hivernale des sols. Ainsi, pour la classe « sols nus à peu couverts », la connaissance du précédent cultural et de la culture de l'été suivant, permet de discriminer la classe « sols nus véritables » qui correspond par exemple, à une parcelle en sol nu l'hiver suivi d'un maïs en été. Cette approche via les successions culturales permet par ailleurs de repérer clairement les parcelles en céréales l'hiver dont leur faible taux de couverture ne permettait pas de les classer correctement.

Le tableau 10 présente pour l'hiver 2001/02, l'état de la couverture hivernale en fonction des précédents culturaux, on observe une forte prédominance des sols couverts qui totalisent 3262 ha soit environ 82% de la SAU (3957 ha). A contrario, la proportion des sols nus à peu couverts sur le bassin versant atteint 695 ha soit à peu près 11% de la surface totale et 17% de la SAU, ce qui est relativement faible au regard de la moyenne bretonne en contexte agricole intensif. On peut par ailleurs, repérer à travers ce tableau, les parcelles sensibles d'un point de vue environnemental, comme les sols nus à peu couverts suivants les cultures de maïs ou les retournements de prairies (sols nus à peu couverts après prairies).

Utilisation du sol	Forêt, lande, friche	Eau	Bâti	Sols nus après céréales	Sols nus après maïs	Sols nus après prairie	sols couverts après céréale	sols couverts après maïs	Prairie
Surface (en ha et % de la surface totale)	1836 29,8%	11 0,17%	343 5,5%	191 3,1%	214 3,5%	290 4,7%	373 6%	577 9,4%	2312 37,6%

Tableau 10- Occupation du sol sur le bassin versant du Yar en janvier 2002

Une autre analyse intéressante dans le cadre des problèmes de transfert de flux polluants consiste à spatialiser les occurrences de sols nus à peu couverts sur le bassin versant du Yar (Figure 29). Cette carte permet par ailleurs d'identifier les parcelles où les dynamiques de changement sont les plus fortes car les occurrences des sols nus à peu couverts même si elles n'identifient pas les « sols nus véritables » démontrent une forte variabilité culturale intra et interannuelle de la parcelle.

Les « sols nus véritables », correspondent aux parcelles détectées en sols nus à peu couverts l'hiver suivis d'un maïs l'été. Elles ne représentent par exemple, pour l'hiver 2000/01, que 4.1% de la surface totale du bassin versant (soit 9,1% de la SAU), comparativement aux 17% de sols nus à peu couverts (SAU) évalués à partir de l'image satellite. Sur la période 1996-2002, les « sols nus véritables » ont avoisiné les 300 ha entre l'hiver 1996-1997 et l'hiver 2000-2001 (Tableau 11).

Hiver 1996-1997	Hiver 1997-1998	Hiver 1998-1999	Hiver 1999-2000	Hiver 2000-2001
330 ha	331 ha	314 ha	331 ha	253
5.4%	5.4%	5.1%	5.4%	4.1%

Tableau 11- « Sols nus véritables » entre deux cultures, en ha et en % de la surface totale (1996-2001)

L'analyse des changements de la couverture hivernale des sols, à travers ces différentes approches, montre qu'une part importante du parcellaire n'est pas concernée par des modifications d'usage des sols. Ainsi, près de 60% de la SAU, est restée en sols couverts sur la période étudiée (1996-2002). Cependant, sur les 40% restant, les dynamiques spatio-temporelles de changement de couverture hivernale des sols restent fortes et concernent spécifiquement la partie aval du bassin versant où les systèmes d'exploitation sont plus diversifiés et intensifs.

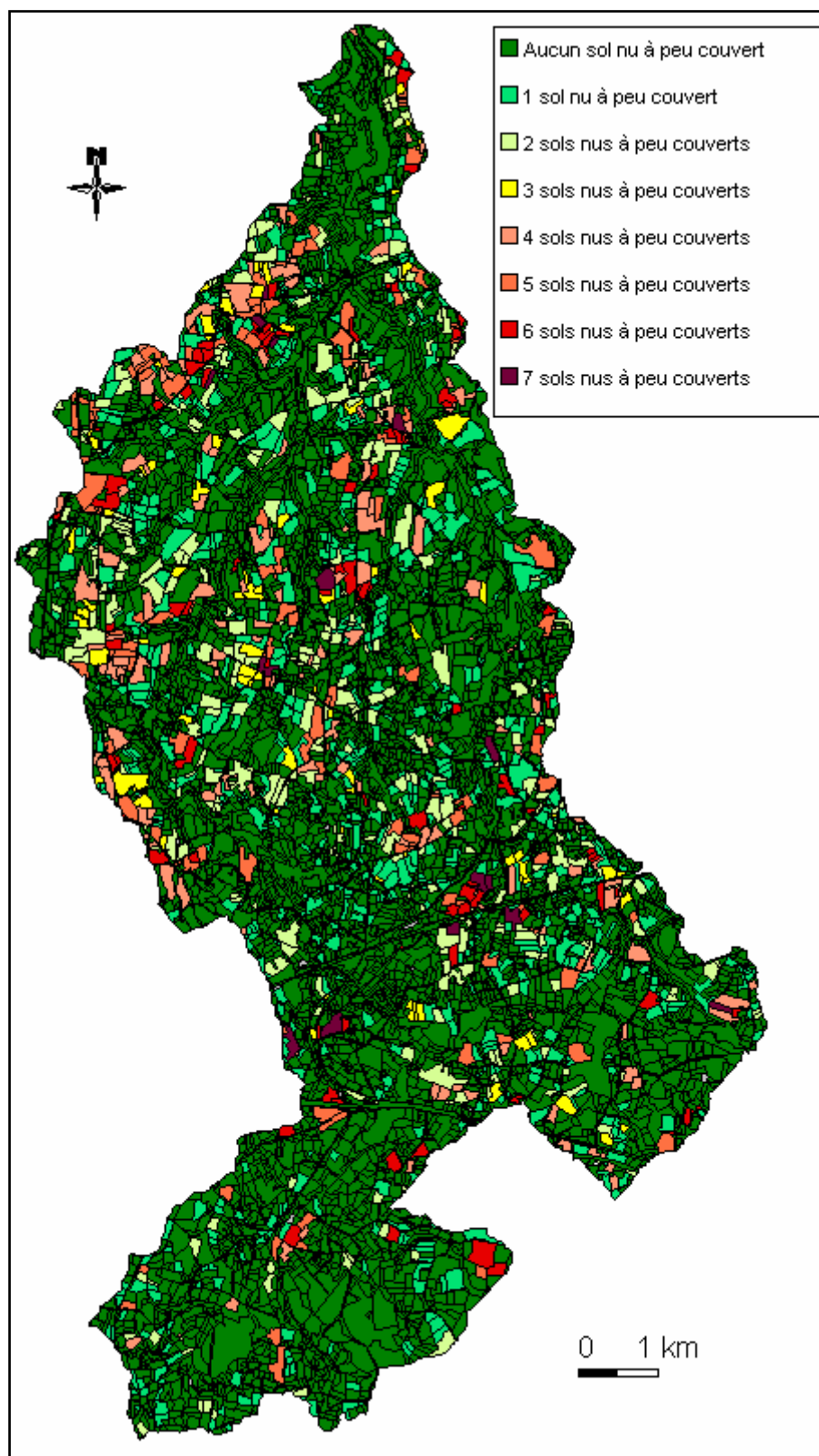


Figure 29- Occurrence des sols nus à peu couverts sur le bassin versant du Yar (1996-2003)

2.3.3. Les facteurs de changement

Les changements d'utilisation des sols des régions agricoles intensives, considérés comme progressifs et diffus à l'échelle globale, ont été assez peu étudiés jusqu'à présent. Une des conséquences directes du caractère partiel et/ou imprécis de la connaissance de ces changements, est que l'identification des facteurs qui les produisent reste une question globalement non résolue. Les recherches sur ce thème peuvent cependant profiter de l'effort de réflexion conceptuelle approfondie qui est effectuée depuis quelques années afin de désigner et de hiérarchiser à différentes échelles les facteurs motivant les changements d'utilisation des sols, en particulier dans le cadre du programme LUCC (Lambin *et al.* 2001 ; Geist et Lambin, 2002).

L'utilisation des sols est largement dépendante de la façon dont les hommes exploitent les ressources terrestres. Il est donc nécessaire de comprendre comment les acteurs sur le terrain sont amenés à prendre des décisions et de quelle manière les facteurs qui motivent les changements interagissent dans certains contextes et influent sur la décision de changer ou non l'usage des terres. A cet égard, il est donc nécessaire de préciser à quelles échelles d'espace et de temps se produisent les changements de couverture hivernale des sols.

2.3.3.1. Les échelles des changements

Les échelles auxquelles se produisent les changements de la couverture hivernale des sols sont envisagées successivement sous l'angle spatial et temporel.

-Echelles spatiales des changements

D'une façon générale, la prise de décision dépend de facteurs qui interviennent à l'échelle locale, régionale voire globale. Selon qu'elles soient directes ou indirectes, les causes des changements ont une origine locale ou non. Les premières correspondent aux actions anthropiques qui impliquent une action physique et ont un impact direct sur l'occupation du sol : elles ont une origine locale et s'expriment, dans le contexte de l'utilisation des sols en régions agricoles intensives, à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation agricole (Figure 30). Les exploitants agricoles contrôlent une partie de ces facteurs locaux. Les causes indirectes constituent les moteurs du changement qui sous-tendent les causes directes du changement. Elles interviennent de façon plus diffuse, souvent en modifiant les causes plus directes du changement. Elles constituent un ensemble complexe de variables socio-économiques, politiques démographiques, technologiques, culturelles, et

biophysiques. Elles sont généralement exogènes aux exploitants agricoles qui n'exercent pas de contrôle sur ces facteurs. Leur origine se situe à des niveaux locaux, mais aussi à niveau régionaux, nationaux et à une échelle plus globale, comme l'Europe. Les relations entre ces niveaux d'organisation sont complexes. Ainsi, les changements d'utilisation des sols sont toujours causés par de multiples facteurs en interaction, qui sont générés à différents niveaux d'organisation des anthroposystèmes. La combinaison de ces facteurs varie dans le temps et dans l'espace, selon le milieu et le contexte humain considéré.


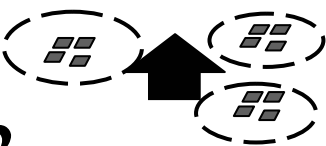
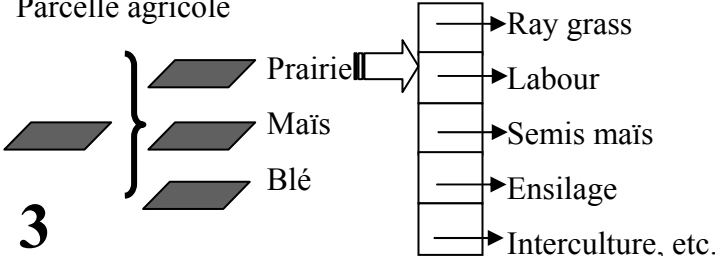
UNITES SPATIALES	FACTEURS DE CHANGEMENT
<p>Bassin versant</p> <p>1</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Actions environnementales - Facteurs physiques (climat, topographie, sols)
<p>Exploitation</p> <p>2</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Variables socio-économiques (statut, primes) - Pentes, sols, etc. - Variables techniques (gestion des prairies)
<p>Parcelle agricole</p> <p>3</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Successions culturales - Gestion des intercultures

Figure 30- Echelles spatiales et facteurs de changements de l'occupation du sol

Ainsi, sur le bassin versant du Yar, les échelles suivantes peuvent être considérées :

-A l'échelle du bassin versant, les mesures environnementales prises par différentes institutions (La Région, le Département, les syndicats de bassins versants, les associations...) sont les principaux facteurs qui interviennent dans les changements d'occupation des sols. Cependant, des conditions climatiques exceptionnelles (inondation ou sécheresse) peuvent également avoir un impact sur la gestion de la couverture hivernale des sols.

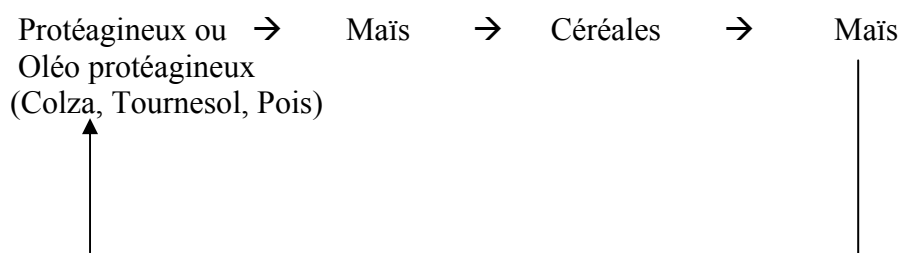
-A l'échelle de l'exploitation, la prise en compte de données socio-économiques (primes, statut et âge de l'exploitant) et physiques (pédologie, morphologie des parcelles, présence d'éléments bocagers) doit permettre d'identifier les facteurs ou variables expliquant les changements d'occupation du sol. A ce niveau d'étude, une base de données importante, mise à disposition par les acteurs locaux, est requise afin de pouvoir spatialiser ces différents facteurs.

-A l'échelle parcellaire, le suivi des cycles de successions culturales représente le principal facteur explicatif des changements observés. Les différents systèmes de production répertoriés sont à prendre en compte et à mettre en relation avec des itinéraires techniques et des types de rotations culturales. En Bretagne, plusieurs systèmes de production peuvent être identifiés et rattachés à des rotations « type » ; Parmi ceux-ci, deux systèmes de production dominants peuvent être cités :

- les systèmes de production « laitier » où l'on retrouve des cycles de rotation intégrant des céréales et des prairies de type temporaire (les surfaces non accessibles par le cheptel sont généralement exclusivement réservées à la culture) :



- Les systèmes de production hors sol (porcs, volailles) intègrent des rotations avec des successions plus complexes comprenant des protéagineux et une part importante de maïs grain :



La base de données constituée ainsi que les connaissances expert sur le bassin versant du Yar permettent de prendre en compte les facteurs de changements se produisant à ces différents niveaux : Le niveau parcellaire essentiellement grâce aux images satellitaires, les autres à travers la base de données transmise par le Conseil Général des Côtes d'Armor, la Communauté d'Agglomération de Lannion et la Chambre d'agriculture et aux connaissances expert.

-Le rythme des changements

La prise en compte des échelles temporelles dans la gestion de l'occupation hivernale du sol représente également un enjeu important. Des changements observés peuvent ainsi correspondre à des actions qui s'inscrivent dans le court, le moyen ou le long terme (figure 31). Les projets relatifs à la gestion du paysage tels que des remembrements génèrent par exemple des changements d'occupation hivernale du sol qui ont un impact significatif à long terme sur de grandes superficies. Au contraire, au niveau des pratiques agricoles, une prairie retournée suivi d'un maïs ne sera que très peu de temps potentiellement en sol nu. Une échelle intermédiaire concerne la gestion des successions culturales qui peut s'étaler sur une période allant de 5 à 10 ans. La prise en compte de l'aspect temporel est donc indispensable pour la compréhension des changements observés, une identification des différentes échelles de temps permet ainsi de dégager des tendances d'évolution de l'occupation du sol sur le court et le long terme.

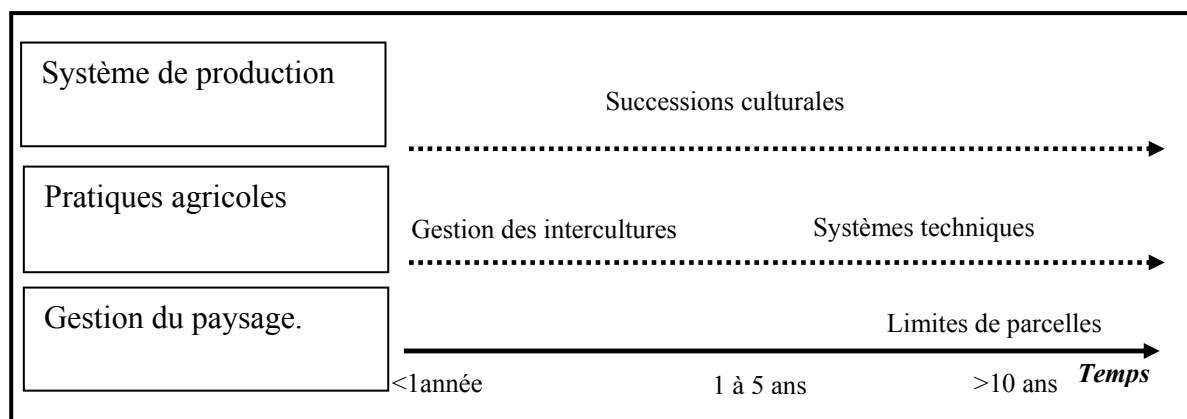


Figure 31- Dynamiques temporelles des changements d'occupation du sol pendant l'hiver

La période d'étude retenue sur le bassin versant du Yar (1996-2003) permet donc de prendre en compte à la fois les changements de couverture hivernale liés aux pratiques agricoles, aux systèmes de production et pour partie à la gestion du paysage.

La prise en compte des différentes échelles spatio-temporelles auxquelles se produisent les changements permet de passer aux étapes d'identification et de hiérarchisation des facteurs qui motivent ces changements.

2.3.3.2. Identification des facteurs

A partir de la base de données constituée par les changements observés, l'identification des facteurs déterminant les changements de couverture des sols peut être enclenchée. Une consultation préalable des experts en agriculture (agronomes de la chambre d'agriculture des Côtes d'Armor, animateurs de bassin versant) permet, par système de

production, de déterminer les facteurs prépondérants expliquant les dynamiques d'évolution de la couverture hivernale du sol sur le bassin versant du Yar (Tableau 12).

Facteurs	Proximité	Taille des parcelles	Morphologie/sols	Cycle de vie	Quotats/SAU	Mesures Agri-environ.
Types Expl.						
Céréales/porcs			2			1
Vaches laitières	2	4	4	5	3	1
Vaches allaitantes		3	2	4		1
Mixte lait + Viande	2	3	3	4		1

Tableau 12- Hiérarchisation des facteurs de changement par système de production agricole.

A ce niveau, deux facteurs sont abandonnés : le facteur « morphologie/sols » car les données relatives à ce facteur sont beaucoup trop incomplètes et le facteur « cycle de vie », où la donnée fait partiellement défaut.

Le critère des successions culturales, un temps envisagé par les experts comme pouvant motiver les changements de la couverture hivernale des sols, est également rejeté car plus de 300 types de successions sont identifiés sur le bassin versant du Yar de 1996 à 2003, ce qui rend le traitement des données trop complexe. Ce chiffre élevé s'explique entre autre par les dynamiques culturales propre des différents types de production et le fait qu'elles s'inscrivent sur un pas de temps relativement long et donc sujet à des paramètres difficilement contrôlables (climat, changement d'exploitant, regroupement de parcelles, ...). Cependant, l'analyse statistique des changements passés observés permet d'identifier les occurrences de sols nus à peu couverts comme un facteur de changement de la couverture hivernal pertinent. En effet, les occurrences de sols nus à peu couverts sont parfois fortement corrélées aux dynamiques inter-hivernales des parcelles. Ainsi, le croisement des vecteurs de changement avec la carte des occurrences montre que, pour les parcelles concernées par 5 occurrences, 66% d'entre elles (soit 840 ha) ont connu des changements importants ou très importants. pour les parcelles avec 4 occurrences on obtient 62% de parcelles caractérisées par des changements importants et très importants entre les hivers. Par ailleurs, on constate que les faibles occurrences sont généralement caractérisées par de faibles changements de couverture, expliquées par de faibles variations de stades phénologiques pour une même culture ou des changements d'état pour un même type de couvert. Ainsi, sur les 3914 ha détectés en sols

couverts de 1996 à 2002, plus de 2750 ha, soit 70% sont caractérisés par de faibles changements, ces parcelles correspondant souvent à des prairies permanentes.

Ainsi, pour le « système bovin mixte », les facteurs retenus sont les suivants : les occurrences de sols nus à peu couverts, la taille des parcelles, la proximité du parcellaire par rapport au siège d'exploitation et les mesures agro-environnementales (conversion de l'exploitation en système biologique par exemple, CTE,...).

Ces facteurs, déterminés par les experts ont fait l'objet d'une validation réalisée par confrontation avec les changements passés observés dérivés des images de télédétection. Pour l'hiver 2002-2003, la figure 32 montre les relations entre les facteurs explicatifs et la variable expliquée qui ont ainsi été mises en évidence (seule la SAU est ici prise en compte ; le jeu de classe est binaire : sol couvert et sol nu à peu couvert). L'analyse de la relation entre le pourcentage de sols nus en hiver et la variable explicative « occurrence sols nus » montre que, globalement, plus les occurrences sont importantes, plus la probabilité de retrouver un sol nu à peu couvert pour l'hiver 2002-2003 est forte. La taille des parcelles influe également sur la présence des sols nus hivernaux, puisque les parcelles inférieures à 2 ha sont très majoritairement (80%) couvertes par la végétation au cours de l'hiver 2002-2003. La distance de la parcelle au siège d'exploitation joue également un rôle puisque les sols sont plus fréquemment couverts lorsque la distance est élevée. Enfin, comme on pouvait s'y attendre, le choix du mode de production modifie la couverture hivernale des sols, les producteurs en mode biologique implantant davantage d'intercultures que les autres.

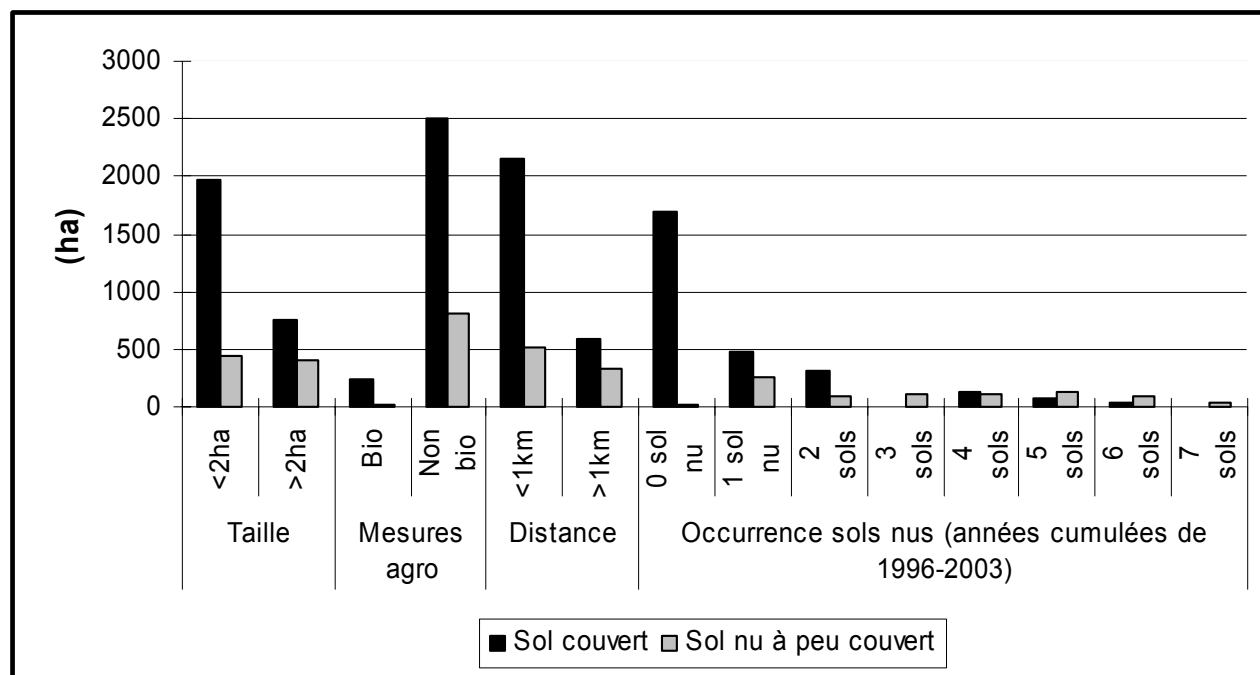


Figure 32- Variations de la présence de couvert végétal en hiver selon les variables explicatives désignées par les experts (analyse réalisée pour l'hiver 2002-2003)

Les facteurs de changement désignés par les experts agricoles sont donc bien corrélés avec la couverture hivernale des sols. Cependant, cette première validation n'a pas permis de mesurer le « poids » de chaque variable explicative. Or une hiérarchisation de ces facteurs reste indispensable dans le processus de modélisation prédictive de l'occupation hivernale du sol. Une analyse plus fine des données doit ainsi être engagée pour fournir une hiérarchisation complète des variables explicatives.

2.3.3.3. Hiérarchisation des facteurs

De nombreux outils statistiques existent pour mettre en relation les variables explicatives et la variable à expliquer (Analyse factorielle des correspondances, Régressions multiples, etc.). Une méthode basée ici sur l'information mutuelle et la redondance entre les variables est appliquée pour hiérarchiser les facteurs identifiés. Cette analyse est basée sur la théorie de l'information (Shanon et Weaver, 1949), utilisée pour quantifier l'information relative à un événement en relation avec l'information apportée par la réalisation de cet événement. Ainsi, la quantité d'information (relative à un contenu statistique) est d'autant plus importante que la réalisation d'un événement est peu probable. Cette théorie a de nombreuses fois été utilisée pour des applications environnementales (Thenail, 2002) et offre l'avantage de travailler sur des valeurs catégorielles, sans contraintes d'effectifs.

2.3.3.3.1. Principe du test de l'information mutuelle

Le test d'information mutuelle s'effectue en plusieurs étapes et génère ainsi différents indicateurs expliquant les relations entre les variables (Baudry, 1992) :

- L'entropie

L'information mutuelle entre les variables est basée sur la notion d'information dont la principale propriété repose sur le fait que la quantité d'information est maximale quand les événements sont équiprobables. Elle permet de calculer les quantités d'informations (entropie, I) entre différentes variables :

$$I = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad n = \text{nombre de résultats possibles}$$

Pi = probabilité d'occurrence du résultat i

- L'information mutuelle

L'information mutuelle entre deux variables, appelée également néguentropie (N), représente l'information apportée par une variable lorsque la seconde est réalisée. Elle est obtenue à partir des calculs d'entropie (I) :

Soit A et B deux variables avec n modalités, alors $N(A, B) = I(A) + I(B) - I(A, B)^*$

* I (A, B) représente l'hétérogénéité de la matrice $A \times B$

- La redondance

La redondance découle des deux premières, elle mesure le taux d'hétérogénéité de deux variables :

$$R = \frac{N(A, B)}{I(B)} \text{ (ici, on mesure le taux d'hétérogénéité de B lié à l'hétérogénéité de A)}$$

- Test de signification (K)

Enfin, un test de signification statistique de la liaison entre A et B mesuré par N ou R peut être calculé avec le critère de Kullback (1959). Celui-ci correspond approximativement à un test du χ^2 .

La procédure mise en œuvre fournit une hiérarchisation de la quantité d'information des variables explicatives par rapport à la variable à expliquer. Le logiciel « Zephyr », développé à l'INRA (Baudry et Al Jallad, 1992) est ici utilisé pour cette analyse. Les paramètres d'entrée doivent être catégoriels et correspondre à un identifiant de parcelle.

2.3.3.3.2. Résultats

Une analyse statistique basée sur l'information mutuelle fournit de nombreux indicateurs de corrélation entre les variables explicatives (ici les facteurs de changements) et la variable expliquée (ici les changements intervenus au niveau de la couverture hivernale des sols). Pour cette étude, nous analyserons les relations entre variables explicatives et variable expliquée à travers l'étude de la néguentropie pour chaque couple de variables et de la redondance, qui mesure le taux d'occurrence de la variable explicative en liaison avec les effectifs de la variable à expliquer. Puis nous nous attacherons à détailler l'entropie des classes de la variable la plus significative selon leur variabilité spatio-temporelle. Enfin, nous déterminerons, à travers une classification par hiérarchie descendante, les facteurs explicatifs des « occurrences des sols nus à peu couverts » observés sur la période 1996-2003

. Les relations entre les variables explicatives et la variable à expliquer

Chapitre 2. Modélisation prédictive à partir de la théorie des évidences

Les résultats présentent une très forte relation entre la variable « Occurrence des sols nus à peu couverts » (1996-2002) et la variable « Présence du couvert hivernal pour l'hiver 2002-2003 », et une relation beaucoup moins étroite avec les trois autres variables explicatives (Tableau 13).

Variables explicatives	Classes	Effectifs (nombre de parcelles et pourcentage)	Redondance	Entropie mutuelle	Inf. mutuelle	Test de Signification
Proximité de la parcelle par rapport au siège d'exploitation	1 : parcelle < 1 Km du siège d'exploitation	3082 (81,6%)	2,30%	0,902	0,100	75,55
	2 : parcelle > 1 Km du siège d'exploitation	697 (18,4%)				
Mesure agro environnementale	1 : parcelle concernée par une mesure agro environnementale	196 (5,19%)	0,23%	0,637	0,0010	1,94
	2 : parcelle non concernée par une mesure agro environnementale	3583 (94,8%)				
Taille des parcelles	1 : parcelle < 2 ha	3413 (90,3%)	2,62%	0,741	0,114	22,41
	2 : parcelle > 2 ha	366 (9,7%)				
Occurrences des sols nus à peu couverts (1996-2002)	1 : sol couvert tous les hivers	2185 (57,8%)	44,25%	1,547	0,192	103,2
	2 : sol nu à peu couvert durant un hiver	770 (20,4%)				
	3 : sol nu à peu couvert durant 2 hivers	352 (9,31%)				
	4 : sol nu à peu couvert durant 3 hivers	85 (2,25%)				
	5 : sol nu à peu couvert durant 4 hivers	159 (4,21%)				
	6 : sol nu à peu couvert durant 5 hivers	118 (3,12%)				
	7 : sol nu à peu couvert durant 6 hivers	110 (2,91%)				

Tableau 13-Hiérarchisation des variables explicatives à partir de l'analyse par information mutuelle

La néguentropie, qui mesure la connaissance que l'on a de la variable expliquée quand on connaît la variable explicative, illustre la forte relation de la variable « occurrence des sols nus à peu couverts (1996-2002) avec la variable « Présence du couvert hivernal pour l'hiver

2002-2003 » (0,192). Au contraire, pour la variable « mesures agro-environnementales », on obtient 0,001 ce qui signifie que tous les états de la variable « Présence du couvert hivernal pour l'hiver 2002-2003 » sont équiprobables quelles que soient les modalités de la variable explicative. Un si faible résultat s'explique d'une part par le faible effectif des parcelles concernées par des mesures environnementales (5,19 %), et d'autre part, par le fait que dans cette variable sont intégrés les CTE (contrats territoriaux d'exploitation) et les conversions biologiques, caractérisés chacun par des modes de gestion spécifiques. Les variables « Proximité » et « Taille des parcelles » ont des valeurs sensiblement identiques plutôt faibles, indiquant cependant une relation significative avec la variable à expliquer.

La redondance, qui mesure l'organisation du système, montre ainsi que 44,25 % des modalités de la variable « Présence du couvert hivernal pour l'hiver 2002-2003 » sont liées à la variable « Occurrence des sols nus à peu couverts (1996-2002) ». Viennent ensuite la variable « Taille des parcelles » avec 2,62 %, la variable « Proximité de la parcelle au siège d'exploitation » avec 2,30 % et la variable « Mesures agro-environnementale » avec 0,23 %. On note également que toutes les variables explicatives ont un degré de signification supérieur à 5 % ce qui prouve une relation effective, statistiquement significative, entre toutes les variables explicatives et la variable expliquée.

-Analyse de l'entropie de la variable « occurrence des sols nus à peu couverts »

La distribution spatiale de l'entropie entre les différentes classes de la variable « Occurrence des sols nus à peu couverts » en relation avec la variable « Présence du couvert hivernal pour l'hiver 2002-03 » est illustrée par la figure 33. L'entropie étant maximale quand tous les événements sont équiprobables, lorsque celle-ci est égale ou proche de zéro, une des classes de la variable est alors fortement corrélée à la variable expliquée. C'est le cas ici pour les parcelles en sol couvert tous les hivers et pour les parcelles en sols nus à peu couverts durant 3 hivers. Pour ces dernières, la totalité des parcelles (85 parcelles) est en sol nu à peu couvert au cours de l'hiver 2002-2003. Pour les parcelles couvertes tous les hivers, qui correspondent généralement à des prairies permanentes, 99,8 % d'entre elles sont détectées en sol couvert pour l'hiver 2002-2003, ce qui explique la très faible entropie mesurée (0,013) et montre la très forte stabilité spatio-temporelle de cette classe. Elle couvre en moyenne sur la période d'observation 35 % de la SAU, la place des prairies étant importante dans les systèmes de production présents sur le bassin versant du Yar. Les parcelles concernées par de fortes occurrences de sols nus à peu couverts (4 à 6 sur la période étudiée) sont *a contrario* caractérisées par une forte entropie (0,599 à 0,688). Par exemple, sur les 159 parcelles caractérisées par 5 hivers en sols nus à peu couverts sur la période étudiée, 93 sont en sol couvert en 2002-2003 et 66 en sols nus à peu couverts. Ces parcelles sont donc caractérisées par une très forte variabilité d'évolution de l'occupation hivernale du sol.

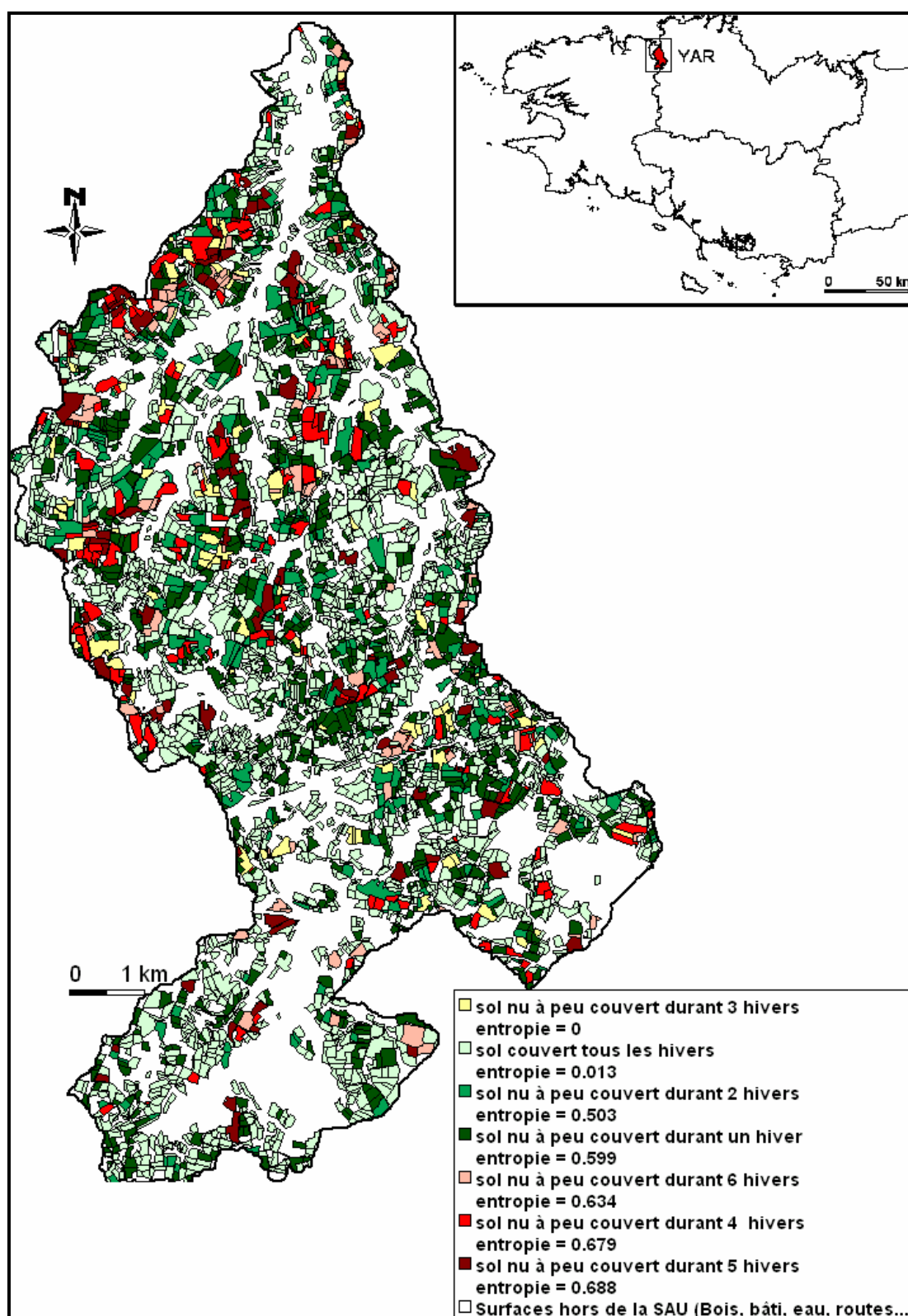


Figure 33 - Entropie entre les classes de la variable « Occurrences des sols nus à peu couverts » et la variable « Présence du couvert hivernal pour l'hiver 2002-2003 » sur le bassin versant du Yar.

-Les facteurs explicatifs de la variable « Occurrences des sols nus à peu couverts » observée sur la période 1996-2003

Après avoir hiérarchisé les variables explicatives, une classification hiérarchique descendante est effectuée à partir de la variable «Occurrences des sols nus (1996-2003)» afin de déterminer, pour chacun des modes ou classe de cette variable, des combinaisons hiérarchiques des trois autres variables qui ont un poids plus faible dans l'explication de la présence du couvert végétal au cours de l'hiver 2002-2003. La procédure consiste donc à identifier des « groupes de solutions» construits à partir des modalités de la variable fournissant le plus d'information. Trois règles d'arrêt sont intégrées dans la procédure de classification : celle-ci est stoppée lorsqu'il n'y a plus assez de parcelles (le seuil est ici fixé à 10), ou lorsque l'entropie est trop faible ou encore lorsque toutes les variables explicatives sont utilisées. Dans cette étude, 10 groupes de solution sont créés d'après ces règles d'arrêt.

Chaque « groupe de solutions » est créé à partir des 7 modalités de la variable « occurrences des sols nus à peu couverts (1996-2003)», chacune de ces modalités ou classes, de « SN0 » à « SN6 » correspondant à la fréquence de retour de sol nu sur la parcelle au cours des 7 hivers.

Un exemple est donné dans la figure 34 avec la modalité SN6 (qui correspond aux parcelles détectés 6 hivers en sols nus à peu couverts). Celle-ci concerne 118 parcelles dont la relation la plus forte se fait avec la variable « mesure agro-environnementale ». La classification s'arrête alors pour la modalité BIO1 (parcelles concernées par des mesures agro-environnementales) puisque le nombre de parcelles est insuffisant (Groupe solution 8). Elle continue par contre avec la modalité BIO2 (parcelles sans mesures agro-environnementales) fortement liée à la variable Taille composée de deux modalités : Taille1 (inférieur à 2 ha) et Taille2 (supérieure à 2 ha). L'entropie avec les modalités de la dernière variable Distance étant trop faible, la classification est stoppée et les groupes de solutions identifiés (Groupe solution 9 et 10).

Sur les 10 groupes solutions identifiés, 7 sont caractérisés dès la 1^{ère} étape car l'entropie avec les autres variables est trop faible, ainsi, seuls 3 groupes de solution sont construits en relation avec les autres variables et comme pour l'exemple exposé pour la modalité SN6, les variables « mesure agro-environnementale » et « taille » présentent le plus de corrélation.

Néanmoins, l'étude des différents groupes en relation avec les 3 variables explicatives s'avère intéressante. Ainsi, l'analyse du quatrième groupe, calculée à partir de la quatrième modalité de la variable « occurrence des sols nus à peu couverts (SN4) » montre que sur les 85 parcelles composant ce groupe de solutions, la totalité est en sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003, mais seulement 28 d'entre elles sont localisées à une distance

supérieure à 1 km de l'exploitation et un quart de ces parcelles ont une surface supérieure à 2 ha.

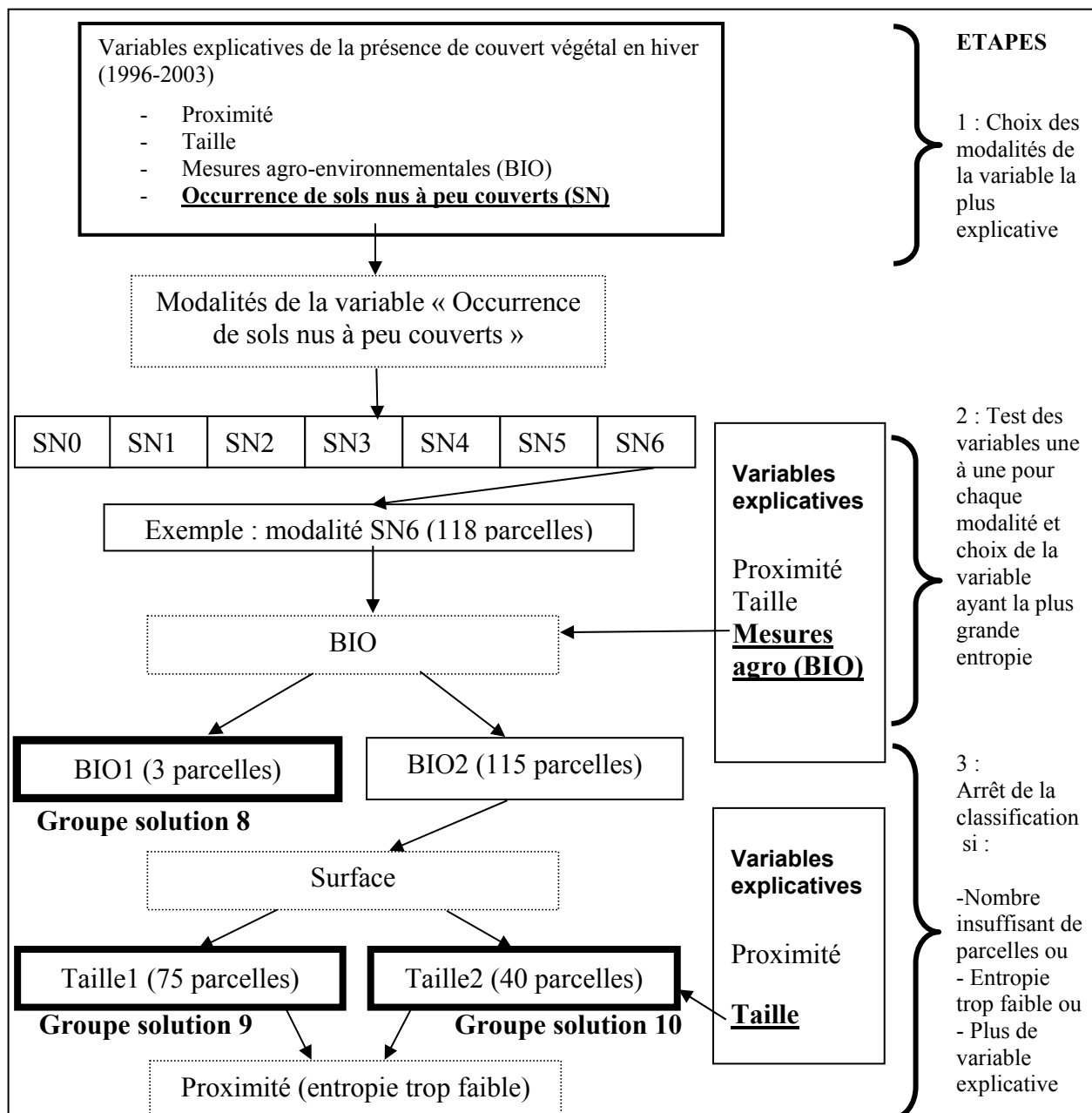


Figure 34 - Etapes de la création des « groupes de solutions » par classification descendante

Pour palier les faibles valeurs informatives des variables « Proximité », « Mesure agro-environnementale » et « Taille des parcelles », une structuration plus fine des données d'entrée devrait permettre de ne pas sous évaluer le poids de ces variables : Ainsi, les faibles niveaux de redondance obtenus pour la variable « proximité » s'expliquent entre autres par le

fait que de nombreuses parcelles ont leur siège d'exploitation localisé à l'extérieur du bassin versant ; par ailleurs des groupements d'exploitation ont pu avoir lieu, rendant le jeu de données obsolète. Enfin, une description plus détaillée des types de mesures environnementales concernant chaque exploitation fournirait pour cette variable un apport informatif important dans sa relation avec la couverture hivernale des sols. Cette analyse basée sur l'information mutuelle a permis de souligner l'inertie du système au moins jusqu'en 2003, puisque mise à part la variable « occurrence des sols nus à peu couverts » caractérisée par un test de signification important, les 3 autres variables, bien que significatives, n'apportent pas l'information escomptée dans l'explication des changements d'occupation du sol.

2.3.4. Prédiction de la couverture hivernale des sols appliquée au système d'exploitation de type « bovin mixte »

L'application de la règle de fusion de Dempster-Shafer pour une modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols est réalisée pour le système agricole de type « bovin mixte » pour l'hiver 2000/01, système le plus représenté sur le bassin versant du Yar. Soixante dix-sept exploitations sont concernées par ce type d'exploitation, couvrant près de 1800 ha, soit près de 45% de la SAU du bassin versant. L'affectation des jeux de masse, puis la prise de décision et les résultats sont commentés ci-dessous.

2.3.4.1. Affectation des jeux de masse pour chaque hypothèse, fusion des données, et prise de décision

Rappelons que le cadre de discernement correspond ici à l'hypothèse « Sols nus à peu couverts », l'hypothèse « Sols couverts » et l'union de ces deux hypothèses qui représente l'incertitude. Chaque source d'évidence, qui correspond ici à un facteur de changement, reçoit une fonction de masse pour les deux hypothèses et leur union. Ces affectations sont réalisées et validées conjointement, à dire d'expert et à partir de la hiérarchisation des facteurs de changement (Tableau 14).

On remarque que les fonctions de croyance pour l'ensemble des facteurs identifiés sont globalement entachées d'une faible incertitude. La fonction de masse la plus importante associée à l'union des hypothèses, est ainsi de 0,3 et concerne les parcelles inférieures à 2 ha pour lesquelles les analyses statistiques et les dires d'expert concordent pour caractériser cette variable explicative comme étant imprécise et incertaine. Le reste des variables sont plus précises, par exemple, la variable « Sols couverts tous les hivers » est elle concernée, par une

fonction de masse importante (0,95) pour l'hypothèse « Sols couverts » illustrant pour ces parcelles, un très forte probabilité d'évolution dans ce sens.

Facteurs	Classes	Hypothèse "sols nus à peu couverts »	Hypothèse "sols couverts »	Incertitude (Union des deux hypothèses)
Distance par rapport au siège d'exploitation	1 {parcelles < 1 km du siège d'exploitation}	0,3	0,5	0,2
	2 {parcelles > 1 km du siège d'exploitation}	0,6	0,2	0,2
Mesures agro-environnementales	1 {parcelles sans mesures agro-environnementales}	0,6	0,3	0,1
	2 {parcelles sans mesures agro-environnementales}	0,005	0,95	0,045
Taille des parcelles	1 {parcelles < 2 ha}	0,2	0,5	0,3
	2 {parcelles > 2 ha}	0,65	0,2	0,15
Occurrences des sols nus à peu couverts (1996-2001)	1 {sols couverts tous les hivers}	0,005	0,95	0,045
	2 {sols nus à peu couverts durant 1 hiver}	0,01	0,9	0,09
	3 {sols nus à peu couverts durant 2 hivers}	0,25	0,7	0,05
	4 {sols nus à peu couverts durant 3 hivers}	0,45	0,4	0,15
	5 {sols nus à peu couverts durant 4 hivers}	0,65	0,3	0,05
	6 {sols nus à peu couverts durant 5 hivers}	0,85	0,1	0,05

Tableau 14- Affectation des jeux de masse pour chaque hypothèse

Une fois que l'ensemble des sources d'évidence - ou facteurs de changement - sont affectées de masses pour chacune des hypothèses, elles sont fusionnées à travers la règle de Dempster-Shafer.

Trois mesures sont produites pour chaque hypothèse : la probabilité pignistique, la croyance et la plausibilité. Comme nous l'avons défini au début de ce chapitre, la probabilité pignistique est ici privilégiée pour la prise de décision sur l'intervalle [croyance ; plausibilité], car elle constitue un compromis intéressant entre la mesure « pessimiste » de la croyance –ou degré de confiance- et la mesure « optimiste » de la plausibilité.

2.3.4.2. Résultats

-Les mesures de probabilité pignistique

La répartition des valeurs de probabilité pignistique pour l'hypothèse « sols couverts » montre l'importance de cette classe sur le bassin versant du Yar puisque 1558 parcelles, soit 83% d'entre elles ont des valeurs supérieures à 0,8 soit une « croyance » très forte d'être en sols couverts durant l'hiver 2001/2002 (Tableau 15). Au contraire, seulement 119 parcelles sont affectées d'une faible croyance (inférieures ici à 0,40) qui spatialement sont localisées sur la partie aval du bassin versant. Ce sont généralement de grandes parcelles caractérisées par des dynamiques d'occupation hivernale des sols importantes, et sur lesquelles, les mesures de croyance pour l'hypothèse « Sols couverts » sont moins précises et plus incertaines, générant ainsi de plus faibles valeurs de probabilité pignistique.

Niveaux de mesures	Parcelles
[0,007539- 0,206018] : Très faible probabilité	56
[0,206018- 0,404497] : Faible Probabilité	63
[0,404497- 0,602975] : Probabilité notable	93
[0,602975- 0,801454] : Forte probabilité	86
[0,801454- 0,999933] : Très forte probabilité	1558

Tableau 15- Seuillage des probabilités pignistiques pour l'hypothèse « sols couverts »

Pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts », la spatialisation des résultats (Figure 35) permet de noter que les probabilités de retrouver des parcelles en sols nus à peu couverts sur les parcelles en amont du bassin versant sont peu importantes, puisque la majorité du parcellaire dans cette partie du bassin versant est caractérisé par des valeurs de probabilités pignistiques inférieures à 0,15. En revanche, on remarque que sur la partie centrale et à l'aval du bassin versant, les parcelles ayant une forte voir très forte probabilité d'évoluer en sols nus à peu couverts sont beaucoup plus nombreuses car les parcelles dans cette partie du bassin versant sont caractérisées par des tailles importantes et de fortes occurrences de sols nus à peu couverts ». Cependant, une large majorité du parcellaire est concernée par de très faibles probabilités d'évoluer en sols nus à peu couverts.

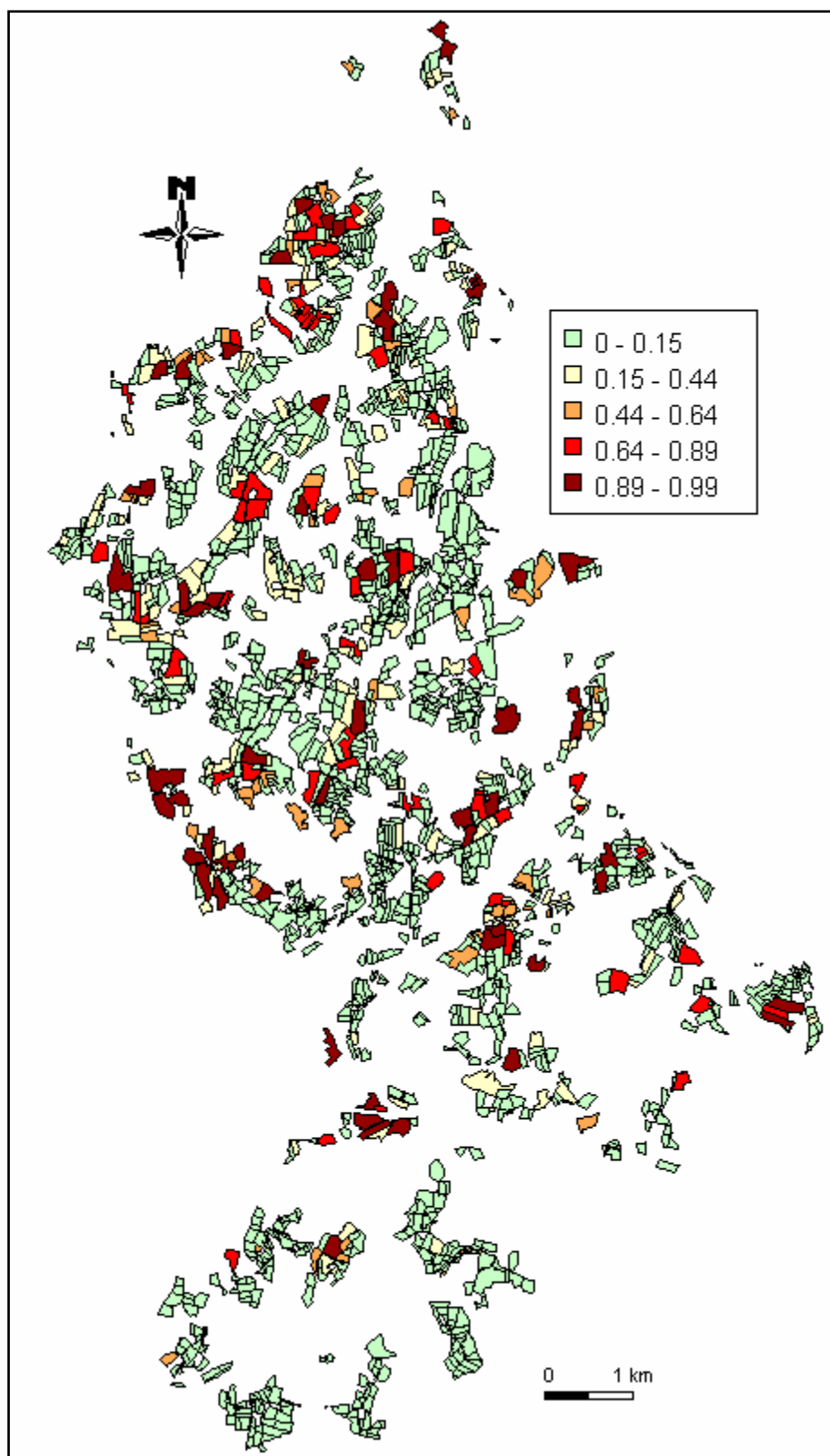


Figure 35- Répartition des niveaux de probabilités pignistiques pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts »

Une comparaison entre les probabilités pignistiques et l'estimation de la couverture hivernale à partir de l'image satellitaire de l'hiver 2001/2002 montre que pour un seuil de probabilité pignistique supérieure à 0,6, les surfaces prédites pour chaque hypothèses sont concordantes avec l'estimation de la couverture hivernale réalisée par télédétection (Tableau 16). Ainsi, pour les parcelles en sols nus à peu couverts, on obtient 312 ha pour une estimation de 319 ha par satellite et 1341 ha pour l'hypothèse sols couverts contre 1480 ha estimés par la classification. On remarque cependant que pour l'hypothèse sols nus à peu couverts, le nombre de parcelles est relativement en deçà de l'estimation par l'image satellite. Au contraire, pour l'hypothèse sols couverts, avec 1644 parcelles, on obtient une légère surestimation des parcelles par rapport aux 1588 parcelles détectées par l'image d'hiver.

Un seuil de probabilité supérieur à 0,7 diminue fortement le nombre de parcelles et les surfaces prédites pour l'hypothèse sols nus à peu couverts (227 ha et 83 parcelles concernées). Pour l'hypothèse sols couverts, ce seuil marque également une baisse notable de la superficie prédite qui passe à 1285 ha. Cependant, la prédiction du nombre de parcelles (1576) concorde mieux avec les résultats issus de l'image satellite. Les seuillages des probabilités pignistiques influent sensiblement sur les résultats. Ainsi, la prise de décision ne peut pas être réalisée avec un seuillage plus ou moins empirique de ces mesures, celui-ci est alors effectué à partir de la différence des valeurs de probabilité pignistique associées aux deux hypothèses.

	Occupation du sol pour l'hiver 2001/2002 (image satellite)	Probabilité pignistique > 0,6	Probabilité pignistique > 0,7
Sols nus à peu couverts	319 ha [268 parcelles]	312 ha [119 parcelles]	227 ha [83 parcelles]
Sols couverts	1480 ha [1588 parcelles]	1341 ha [1644 parcelles]	1285 ha [1576 parcelles]
TOTAL	1799 ha [1856 parcelles]	1653 ha [1753 parcelles]	1512 ha [1659 parcelles]

Tableau 16- Répartition des probabilités pignistique pour les hypothèse « Sols couverts » et « Sols nus à peu couverts »

-La validation spatiale des résultats

L'intersection de la carte d'occupation des sols issue de l'image satellite de l'hiver 2000/2001 avec les résultats de la prédiction (la prise de décision étant le maximum de probabilité pignistique entre les hypothèses) montre des résultats hétérogènes en fonction de l'hypothèse de couverture des sols envisagée (Figure 36). Les erreurs de prédiction apparaissent homogènes sur le bassin versant, on remarque néanmoins qu'une part importante de ces erreurs concernent des parcelles contiguës. Ceci signale généralement, des regroupements parcellaires annonciateurs d'une nouvelle culture. Ce type de changement reste très difficile à modéliser car il dépend uniquement du comportement individuel de l'exploitant.

L'hypothèse sols couverts est fort logiquement la mieux prédite puisque cette classe couvre 82% des parcelles pour l'hiver 2001/2002 (Tableau 17). Avec un taux de prédiction correcte s'élevant à 80,6%, on peut observer que l'identification des facteurs de changements et l'affectation des jeux de masse associés effectués sont pertinents pour modéliser l'évolution de l'occupation du sol pour cette hypothèse. En revanche, l'hypothèse sols nus à peu couverts n'est correcte qu'à hauteur de 35,7%, avec seulement 114 ha correctement prédits sur les 319 ha détectés par l'image satellite.

	Occupation du sol pour l'hiver 2001/2002 (image satellite)	Dempster-Shafer Prise décision : maximum de probabilité pignistique
Sols nus à peu couverts	319 ha	114 ha (35,7%)
Sols couverts	1480 ha	1193 ha (80,6%)
TOTAL	1800 ha	1307 ha (72,65%)

Tableau 17- Résultats du croisement de la couverture hivernale des sols estimée par satellite et de la prédiction avec la théorie de Dempster-Shafer

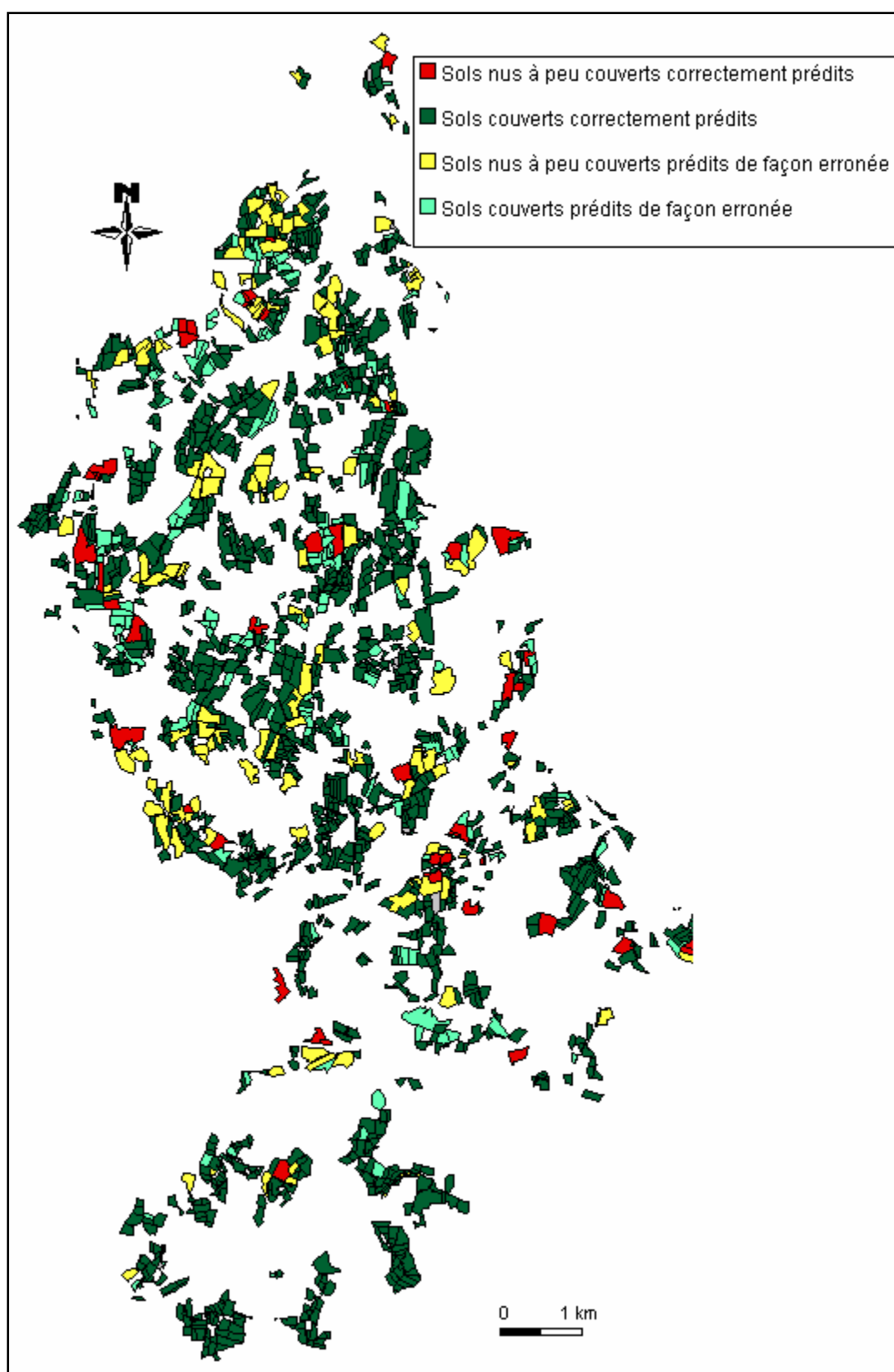


Figure 36- Croisement de la vérité terrain de l'hiver 2001/2002 avec la carte de prédiction pour les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts »

Chapitre 2. Modélisation prédictive à partir de la théorie des évidences

Afin d'affiner l'analyse de la validation des résultats, une carte dit de « véracité », précisant les degrés de confiance associés aux résultats produits, confronte les résultats de la prédiction avec les niveaux d'incertitude (Figure 37), la mesure d'incertitude est réalisé par seuillage de le différence des mesures de probabilités pignistiques.. Une analyse plus détaillée de ces composantes est présentée dans le tableau 18.

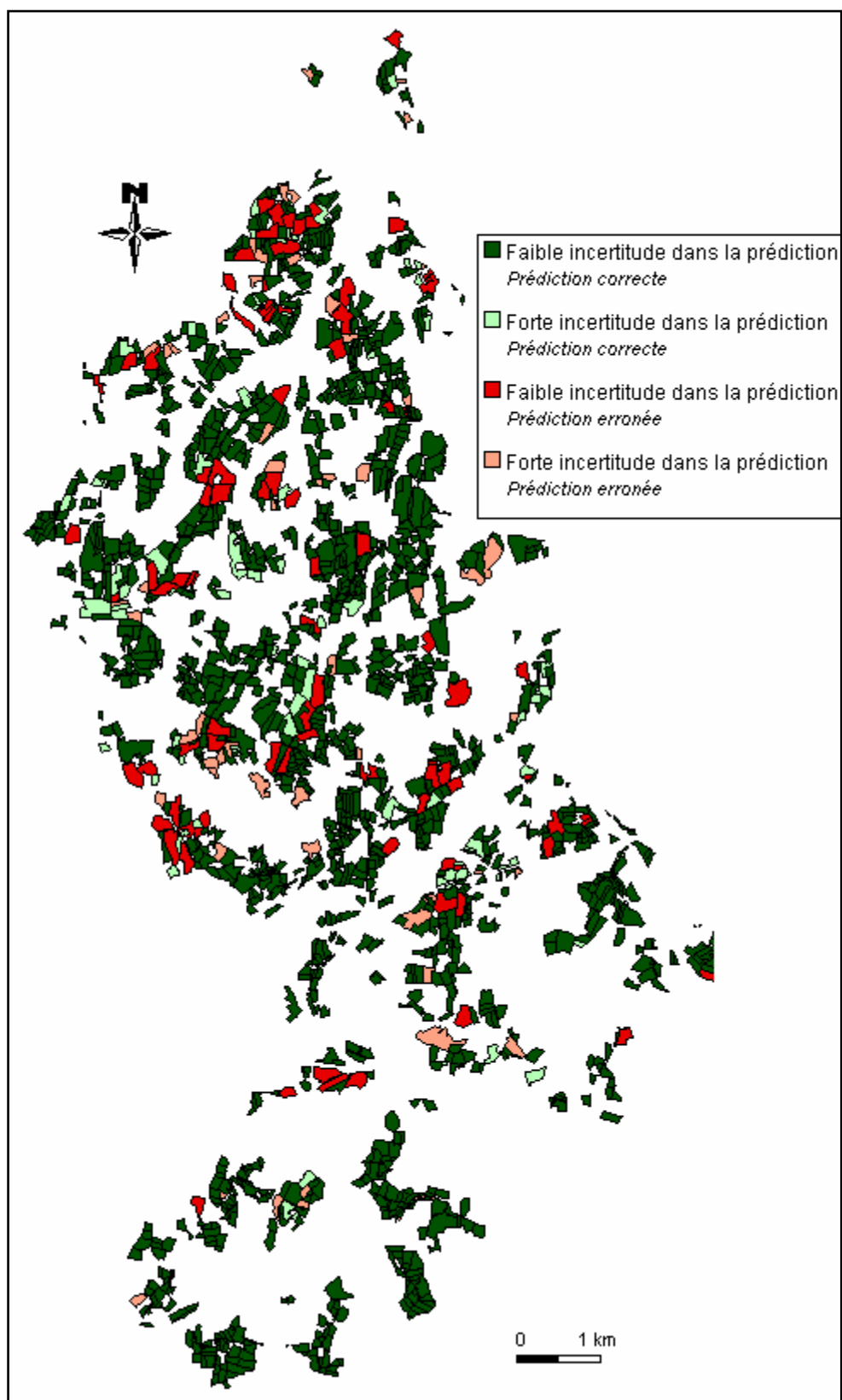


Figure 37- Carte de « véracité » mesurant les niveaux d'incertitude et les résultats de la prédiction confrontée avec le terrain pour les deux hypothèses

	Sols nus à peu couverts validés	Sols couverts validés	Prédiction en sols nus à peu couverts non validés	Prédiction en sols couverts non validés
Faible incertitude	32 parcelles (63%) 95 ha (83%)	1363 parcelles (95%) 1105 ha (93%)	87 parcelles (61%) 217 ha (76%)	196 parcelles (93%) 173 ha (87%)
Forte incertitude	19 parcelles (37%) 19 ha (17%)	71 parcelles (5%) 88 ha (7%)	56 parcelles (39%) 68 ha (24%)	15 parcelles (7%) 26 ha (13%)
TOTAL	51 parcelles 114 ha	1434 parcelles 1193 ha	143 parcelles 285 ha	211 parcelles 199 ha

Tableau 18- Niveaux d'incertitudes et résultats de la prédiction pour les hypothèses sols nus à peu couverts et l'hypothèse sols couverts

L'association des niveaux d'incertitude pour chaque hypothèse avec les résultats de la prédiction de la couverture hivernale des sols offre la possibilité de mesurer la véracité des prédictions. Ainsi, pour les sols couverts correctement prédits, on note que 95% des parcelles sont prédites avec une faible incertitude ce qui prouve une bonne gestion générale du processus de modélisation pour cette hypothèse. En revanche, la prédiction de l'hypothèse sols nus à peu couverts apparaît peu fiable : elle a un faible taux de prédiction correcte et de plus, 37% des prédictions des parcelles correctes sont associées à une forte incertitude.

Si l'on reprend le processus général de la modélisation prédictive mise en œuvre, on peut émettre l'hypothèse que les erreurs de prédiction peuvent provenir à chaque étape de ce processus : de l'identification des facteurs de changement, de l'affectation des jeux de masse pour chaque hypothèse, de la règle de fusion utilisée, de la forte variabilité interannuelle de ce type d'occupation du sol, de facteurs économiques, climatiques... Cependant, les bons résultats de prédiction obtenus pour l'hypothèse sols couverts laissent à penser que les facteurs identifiés et l'affectation des jeux de masse ne sont pas les principales causes du faible taux de prédiction de l'hypothèse sols nus à peu couverts. Ainsi, si l'on analyse les niveaux de conflit entre les sources d'information pour cette hypothèse, une large majorité des parcelles (près de 90% du parcellaire) est caractérisée par un niveau de conflit important entre les sources d'information utilisées. La figure 38 présente ainsi la relation entre les niveaux de conflits et les performances des résultats issus de la fusion pour la prédiction de l'hiver 2001/2002. Ainsi, quand le conflit (k) est élevé entre les sources d'information, alors les résultats de la prédiction baissent. Dans ce cas précis, seulement 75% des parcelles caractérisées par un haut niveau de conflit sont correctement prédites. En revanche, quand le conflit est faible entre les sources, les résultats apparaissent clairement meilleurs avec un taux de prédiction correcte s'élevant à 91%.

Une amélioration des résultats pour l'hypothèse sols nus à peu couverts devra donc prioritairement passer par une amélioration des niveaux de conflit entre les sources. De nombreuses méthodes ont été développées dans le domaine de la fusion de données afin de

mieux gérer ce problème qui se focalisent, selon les cas, sur l'affectation et la gestion des jeux de masse ou sur directement sur les règles de fusion. L'application d'une de ces méthodes doit donc être envisagée afin d'améliorer la prédiction de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar.

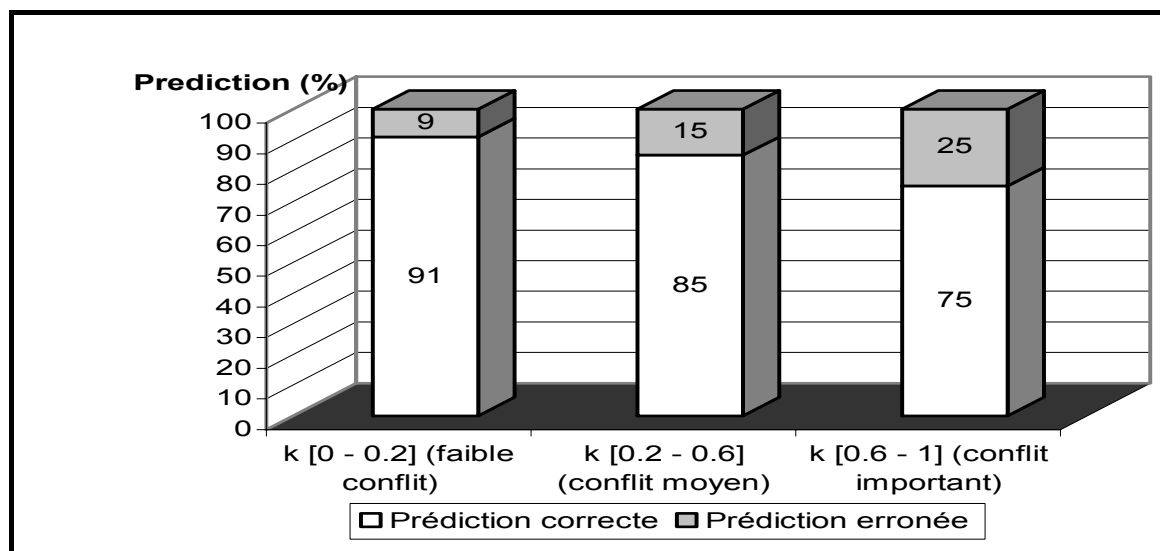


Figure 38- Relation entre les niveaux de conflit pour les hypothèses « Sols nus à peu ouverts » et « Sols couverts » et les résultats de la prédiction avec la théorie de Dempster-Shafer

Conclusion

La modélisation de l'évolution à court terme de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar avec la théorie des Evidences de Dempster-Shafer reposait sur la nécessité de définir, d'analyser et de comprendre les dynamiques qui composent et structurent ce singulier type d'occupation et d'utilisation du sol aux limites spatiales et temporelles floues.

La nature du problème imposait ainsi de privilégier *une approche modélisatrice de type approximative*, où l'incertitude qui caractérise fortement les dynamiques spatiales des couverts hivernaux en Bretagne doit être pris en compte tout au long du processus de modélisation jusqu'aux résultats. La modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols a d'abord nécessité d'identifier, à partir de données de télédétection les états de surface nombreux et diversifiés de la couverture des sols en hiver sur le bassin versant étudié. Leur complexité est telle, et la résolution spatiale des images de télédétection disponibles pour détecter les changements ne permettant de déterminer ni les différents taux de couverture des sols ni la nature des couverts végétaux en place, que seules deux classes d'occupation du sol sont retenues pour la prédiction du couvert : les classes « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts ». Une détection des changements effectuée à partir de la méthode des vecteurs de

changement et de croisements de classifications à partir d'une série multitemporelle d'images satellitaires a permis de mettre en évidence que les changements de couverture hivernale des sols ne concernent sur la période étudiée, qu'environ 40% du parcellaire de la SAU du bassin versant. Les dynamiques spatio-temporelles sur ces parcelles y sont néanmoins importantes agissant sur les taux de couverture à des degrés divers entre les hivers.

L'analyse du suivi réalisé avec différentes méthodes et les connaissances des experts locaux ont permis d'identifier les facteurs de changements de couverture hivernale des exploitations de type bovin mixte. Ces critères validés, ont été hiérarchisés par une méthode reposant sur l'information mutuelle. ***Les résultats de cette analyse ont mis en évidence le poids dominant, des occurrences de sols nus à peu couverts***, mettant ainsi en exergue la relative inertie du système sur la période étudiée, Cette observation est d'ailleurs validée par le fait que les changements importants –nombreuses implantations d'intercultures- sont intervenus à partir de l'hiver 2002-2003.

Les sources d'information décrivant ces facteurs sont ensuite intégrées dans le modèle de fusion de Dempster-Shafer via l'affectation d'un jeu de masses spécifique puisqu'elle intègre l'incertitude. ***La règle de fusion de Dempster-Shafer qui est à même de gérer cette incertitude produit différentes mesures de prédiction de type probabiliste*** validées par la carte d'occupation du sol de l'hiver prédit, en l'occurrence pour l'exemple développé ici l'hiver 2001/2002. Les résultats divergent selon l'hypothèse étudiée : ils apparaissent très faibles pour l'hypothèse sols nus à peu couverts (35% de bonne prédiction) et plutôt bons pour l'hypothèse sols couverts (80% de bonne prédiction).

S'il ne représente pas l'unique cause des erreurs de prédiction parfois importantes comme pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts », ***le degré élevé de conflits entre les sources d'évidence nécessite d'être prioritairement pris en compte***. Il touche en effet une large majorité des parcelles étudiées où certaines sources d'informations s'avèrent parfois même contradictoires, dans le sens où elles peuvent soutenir plusieurs hypothèses. A ce titre, une récente théorie appelée Dezert-Smarandache Theory, (DSmT, 2003) - du nom de ses concepteurs - a été développée pour spécifiquement gérer les problèmes de fusion de données où les sources d'évidence sont fortement conflictuelles, voire paradoxales. Cette approche ainsi que d'autres méthodes de gestion du conflit sont étudiées dans le chapitre suivant, l'objectif étant d'améliorer les résultats de prédiction sur l'évolution de la couverture hivernale des sols.

Chapitre 3

L'approche paradoxale dans le processus de
modélisation prédictive des changements de la
couverture hivernale des sols

La modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar en utilisant la règle de fusion de Dempster-Shafer permet de prédire correctement près de 73% de la couverture des sols pour l'année modélisée. Cependant, si l'hypothèse « sols couverts » offre des résultats concluants, l'hypothèse « sols nus à peu couverts » avec seulement 36% de prédiction validée, révèle des insuffisances dans le processus de modélisation. Une analyse des résultats montre qu'une large majorité du parcellaire étudié sur le bassin versant expérimental du Yar est caractérisée par un degré de conflit important entre les sources d'information, nécessitant le développement d'approches méthodologiques appropriées. La gestion du conflit entre les sources est un problème récurrent dans la fusion de données et de nombreuses méthodes ont été développées pour une gestion optimale de cet aspect.

La gestion du conflit en fusion de données fait ainsi l'objet de la première partie en insistant dans un premier temps sur les aptitudes de la règle de fusion de Dempster-Shafer lorsque les sources d'informations venant soutenir différentes hypothèses sont conflictuelles. Les méthodes de gestion de conflit les plus courantes sont ensuite présentées et commentées et l'une d'entre elles, adaptée à notre problématique, est appliquée. Cette première analyse permet de repérer la ou les sources d'informations responsables du haut niveau de conflit dans notre application. Certaines sources apparaissent ainsi contradictoires ou paradoxales dans le sens où elles peuvent soutenir plusieurs hypothèses du cadre de discernement. Face à ce constat, une théorie récente, appelée « Dezert-Smarandache Theory » (DSmT) a été développée pour, entre autres, gérer cet aspect de la fusion de données que la théorie de l'évidence de Dempster-Shafer (DST) ne permet pas d'appréhender. Cette théorie est présentée dans une seconde partie puis appliquée en deux temps sur le bassin expérimental du Yar. La première application vise à comparer les résultats de cette théorie avec les résultats issus de la théorie de Dempster-Shafer, puis en fonction des analyses effectuées, une optimisation du processus de modélisation est réalisée afin notamment d'améliorer les résultats de l'hypothèse « sols nus à peu couverts ».

3.1. La gestion du conflit en fusion de données

3.1.1. La gestion du conflit entre les sources avec Dempster-Shafer

Le calcul du conflit (k) entre les sources d'information se situe au niveau du dénominateur de la règle de fusion de Dempster-Shafer (Shafer, 1976) qui s'exprime de la façon suivante :

Chapitre 3. L'approche paradoxale dans le processus de modélisation prédictive des changements de la couverture hivernale des sols

-Avec $m_1(.)$ et $m_2(.)$ comme sources d'informations ;

$m(\emptyset) = 0$ et $\forall C \neq \emptyset$ et tel que $C \subseteq \Theta$, on obtient,

$$m(C) \equiv [m_1 \oplus m_2](C) = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A) m_2(B)}$$

La constante de normalisation (K), doit être non nulle, car si $K = 0$, la combinaison entre les sources d'information est impossible.

$$K = 1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A) m_2(B)$$

Dans ce cas précis, cela signifie que les sources d'évidence m_1 et m_2 qui viennent soutenir chaque hypothèse sont totalement contradictoires, le conflit (k) est alors pratiquement total, car proche de 1. Il correspond donc à :

$$k = \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A) m_2(B)$$

Cependant, dans la pratique, il arrive fréquemment que les sources d'information soient contradictoires. L'exemple de Zadeh (1982) appliqué au diagnostic médical montre les limites de la règle d'inférence de Dempster dans ce cas là. Il suppose que deux médecins équitablement fiables, diagnostiquent une pathologie d'un patient qui peut correspondre soit à une méningite cérébro-spinale (M), soit à une contusion cérébrale (C), soit encore à une tumeur cérébrale (T). Le cadre de discernement correspond ici à $\Theta = [M, C, T]$. On suppose également que les deux médecins accordent une faible croyance en la tumeur cérébrale, mais sont en désaccord presque total sur l'origine possible restante, en délivrant les diagnostics suivants :

$$m_1(M) = 0,99 ; m_1(C) = 0 ; m_1(T) = 0,01$$

$$m_2(M) = 0 ; m_2(C) = 0,99 ; m_2(T) = 0,01$$

.

$$m(T) = \frac{m_1(T) m_2(T)}{1 - [m_1(T) m_2(C) + m_1(M) m_2(T) + m_1(M) m_2(C)]} = \frac{0,0001}{1 - [0,0099 + 0,0099 + 0,9801]} \equiv 1$$

Le résultat de la fusion avec la règle de Dempster-Shafer donne comme solution certaine que l'origine de la pathologie est une tumeur cérébrale alors que les deux sources d'information concordent pour ne pas privilégier cette hypothèse. Ce type d'exemple pose un problème fondamental dans la DST et montre ses limites lorsque le conflit entre les sources devient important. Ce cas théorique reste extrême, mais comme il n'est pas toujours possible d'évaluer la fiabilité des résultats issus de la fusion, les conflits entre les sources doivent toujours être évalués de façon rigoureuse. Ceci reste dans la pratique très difficilement réalisable et généralement la gestion du conflit s'effectue au niveau des résultats : des seuils sont définis pour déterminer si une décision est valide ou non.

Un autre problème inhérent à la théorie de Dempster-Shafer se situe au niveau de la très grande sensibilité du résultat en fonction de l'affectation des jeux de masse (Dezert, 2003). Reprenons pour cela l'exemple de Zadeh en introduisant un paramètre de sensibilité $\alpha = 0,0005$ sur les masses fournies par les deux médecins. On obtient alors :

$$m_1(M) = 0,99 - \alpha ; m_1(C) = \alpha ; m_1(T) = 0,01$$

$$m_2(M) = \alpha ; m_2(C) = 0,99 - \alpha ; m_2(T) = 0,01$$

Les résultats de la fusion pour les 3 hypothèses sont les suivants :

$$m(M) = 0,45410 ; m(C) = 0,45410 ; m(T) = 0,0918$$

Les résultats avec ce paramètre de sensibilité très faible sont donc totalement modifiés et illustrent là aussi la faiblesse de DST en présence de conflit important entre les sources d'information.

3.1.2. Les méthodes de gestion du conflit

De nombreuses méthodes ont été développées pour réduire et gérer les risques de conflit entre les sources d'information. Mais les conflits entre les sources ont plusieurs origines, nécessitant souvent des approches différentes. On distingue ainsi les approches basées sur l'affinement des jeux de masses et/ou du cadre de discernement des approches centrées sur la proposition de nouvelles règles de fusion.

- Parmi les premières approches, la méthode d'affaiblissement des sources prend en compte la fiabilité des sources dans le processus de fusion, en affectant un facteur α pour chaque évidence. Une source jugée parfaitement fiable sera ainsi affectée par $\alpha = 1$, une source

totalément non fiable par $\alpha = 0$. Cette méthode, relativement simple à mettre en application, peut s'avérer efficace pour certains problèmes où l'information est purement statistique ; elle devient plus difficile à mettre en oeuvre quand certaines sources d'informations sont qualitatives. L'affectation de ce facteur de fiabilité dans ce cas se fait alors souvent de manière « intuitive » et risque par conséquent de dégrader l'information originale.

L'approche de Yager (1983) est basée sur l'introduction d'une hypothèse inconnue (par exemple, notée θ_0) complémentaire dans le cadre de discernement. Elle correspond donc à une extension du cadre de discernement qui suppose une redéfinition des différents jeux de masse. Mais si elle permet de gérer les risques d'erreurs, l'extension de Yager n'apporte pas de solution pratique, puisque le conflit est géré en fonction d'une hypothèse inconnue n'apportant aucune information supplémentaire. Par ailleurs, cette règle est contraire à un principe de base de la théorie de Dempster qui veut que le cadre de discernement soit exhaustif.

Smets (1990a), avec une approche en « monde ouvert », propose une solution à peu près équivalente où l'on autorise cette fois, l'affectation d'une masse non nulle à l'ensemble vide et le report ainsi du conflit sur cet ensemble vide, tel que :

$$m(\emptyset) = \sum_{A \cap B} m_1(A) m_2(B)$$

Le procédé mathématique est ici différent, mais les deux approches de Yager et de Smets supposent que la source du conflit est due à une (ou plusieurs) hypothèse(s) manquante(s) inconnue(s) que l'on reporte sur \emptyset pour Smets et sur θ_0 pour Yager.

-Concernant les approches centrées sur la proposition de nouvelles règles de fusion, citons les règles de fusion de Yager (1986) et de Dubois et Prade (1998) qui, malgré une bonne gestion du conflit dans les deux cas, ne conservent pas la propriété d'associativité, souhaitable en matière de fusion de données. Faisant suite aux travaux initiés par Inagaki en 1991, Lefèvre *et al.* (2002) ont proposé récemment un formalisme unificateur des règles de fusion. Leurs travaux montrent ainsi qu'il existe une infinité de règles de fusion possibles selon le choix adopté pour un jeu de pondération $\omega(.)$. Il s'agit dans une première étape d'affecter la masse du conflit entre les évidences sur l'ensemble vide selon la méthode développée par Smets, puis de distribuer une partie de cette masse sur les masses $A \subseteq \Theta$ avec des pondérations $\omega(A)$ telles que :

$$\sum_{A \subseteq \Theta} \omega(A) = 1$$

$$\text{Soit : } \forall C \neq \emptyset, \quad m(A) \rightarrow m(A) + \omega(A) m(\emptyset)$$

3.1.3. La gestion du conflit avec l'affaiblissement des sources appliquée au site d'étude

3.1.3.1. L'identification des sources d'information conflictuelles

Gérer les niveaux de conflit entre les sources d'information nécessite au préalable une analyse fine des résultats obtenus avec la règle de fusion de Dempster-Shafer, afin d'identifier les situations où les évidences génèrent ces conflits. L'analyse des résultats est ainsi réalisée successivement pour les deux hypothèses « Sols couverts » et « Sols nus à peu couverts ».

- L'analyse des prédictions effectuées correctement selon l'hypothèse « Sols couverts », révèle que près de 94% des 1434 parcelles concernées ont une surface inférieure à 2 ha (Figure 39). Par ailleurs, 926 d'entre elles sont situées à une distance inférieure à 1 km du siège d'exploitation, caractérisant ainsi des parcelles dont l'utilisation du sol est généralement allouée au pâturage. Les occurrences de sols nus à peu couverts observées sur ces parcelles sont généralement faibles, puisque 90% d'entre elles n'ont pas été sans couverture végétale plus de deux hivers au cours de la période étudiée. Les évidences « Taille », « Proximité », et « Occurrences des sols nus à peu couverts », qui sont affectées par une masse forte, allant dans le sens de la couverture des sols, sont dominantes au niveau de la prédiction. La source d'information ou évidence « Mesures agro-environnementales », qui concerne un faible nombre d'exploitants agricoles, s'avère, quant à elle, conflictuelle. Toutefois, dans la mesure où les trois autres sources d'information vont dans le même sens – la couverture des sols-, la fusion des données avec la règle de Dempster-Shafer permet, dans ce cas, de gérer correctement cette source d'information.

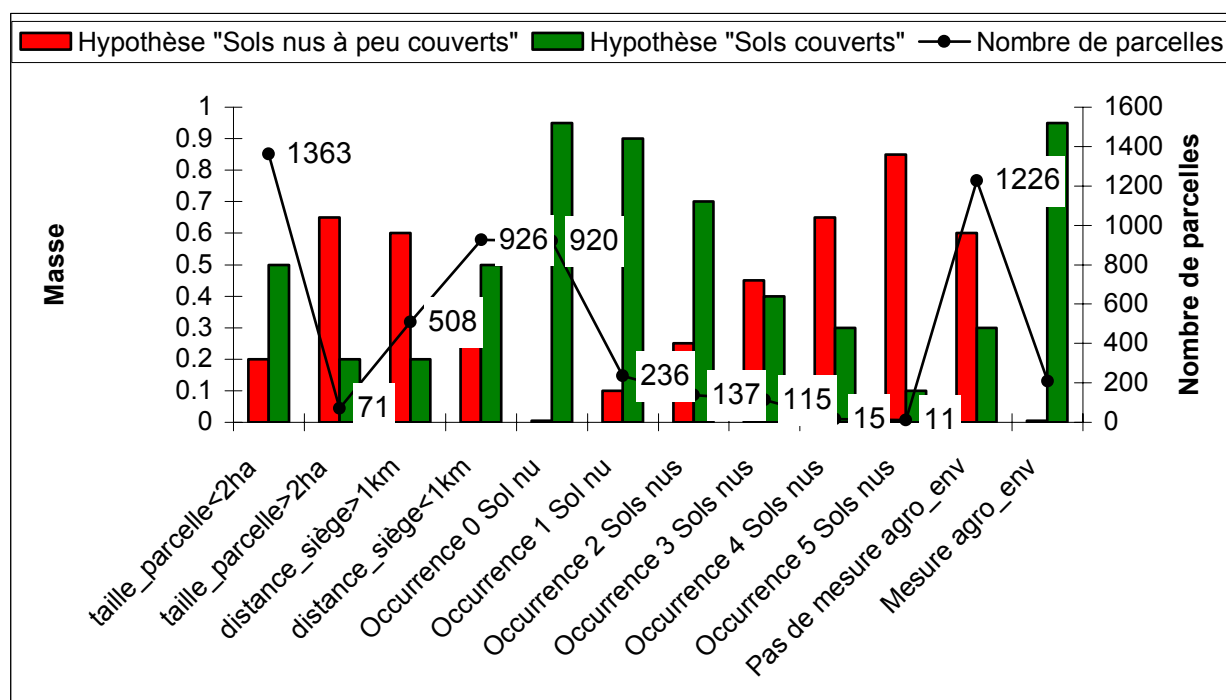


Figure 39- Répartition des jeux de masse selon les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » pour les sols couverts correctement prédits avec la règle de fusion de Dempster-Shafer

-Les prédictions erronées de sols couverts par la végétation concernent majoritairement, pour 95%, des parcelles dont la taille est inférieure à deux hectares (Figure 40), ce qui montre, par confrontation avec les prédictions correctes effectuées sur l'hypothèse « Sols couverts », que les parcelles de petite taille sont majoritairement couvertes. Dans le cas des prédictions erronées, deux autres sources d'information laissent à penser que les sols allaient être couverts : d'une part, 86 parcelles pour lesquelles la prédiction a été mal effectuée n'avaient jamais été détectées en sols nus à peu couverts au cours de la période d'étude ; d'autre part, 128 parcelles pour lesquelles la prédiction est erronée sont localisées à moins d'1 Km des sièges d'exploitation, ces parcelles étant souvent gérées en prairie permanente et donc couvertes l'hiver dans le cadre des systèmes de production de type « Bovin mixte ». Dans ce cas, les erreurs de prédiction sont donc liées à des changements d'occupation du sol de type « accidentel » ou « non attendu » : ainsi, 25 parcelles prédites en « Sols couverts » et appartenant en réalité à la catégorie « Sols nus à peu couverts » sont concernées par des mesures agro-environnementales qui contraignent, en principe, les agriculteurs à couvrir les sols pendant l'interculture. Dans ce cas précis, les erreurs de prédiction s'expliquent par le fait que les sols ont effectivement été couverts, mais la végétation n'a pas été détectée par le capteur satellitaire utilisée pour deux raisons : le couvert végétal n'était pas assez couvrant dans le cas de, céréales plantées tardivement après un maïs grain, et certaines intercultures comme la moutarde étaient nécrosées par une gelée précoce ce qui leur a conféré une signature spectrale proche, très voire confondue avec des sols nus à peu

couverts avec des chaumes de céréales,...Les sources d'évidence ne sont donc pas en cause dans ce cas, d'autant plus que ces erreurs ne concernent que 14% des prédictions de l'hypothèse « Sols couverts ».

Ces prédictions erronées mettent en évidence la grande variabilité de la répartition du couvert végétal d'un hiver à l'autre. La cartographie des résultats (Chapitre 2, figure 36) permet de noter que les parcelles dont l'affectation est erronée sont souvent contiguës, signe révélateur d'un regroupement de parcelles. L'intégration d'informations liées à la gestion du foncier dans des processus de modélisation de l'évolution de la couverture des sols permettrait d'améliorer les taux de prédiction, mais en milieu agricole intensif ce type d'opération reste très complexe car les changements sont très importants d'une année à l'autre, d'une intensité très variable d'un exploitant à l'autre, et les informations relatives à ces modifications sont très difficilement accessibles.

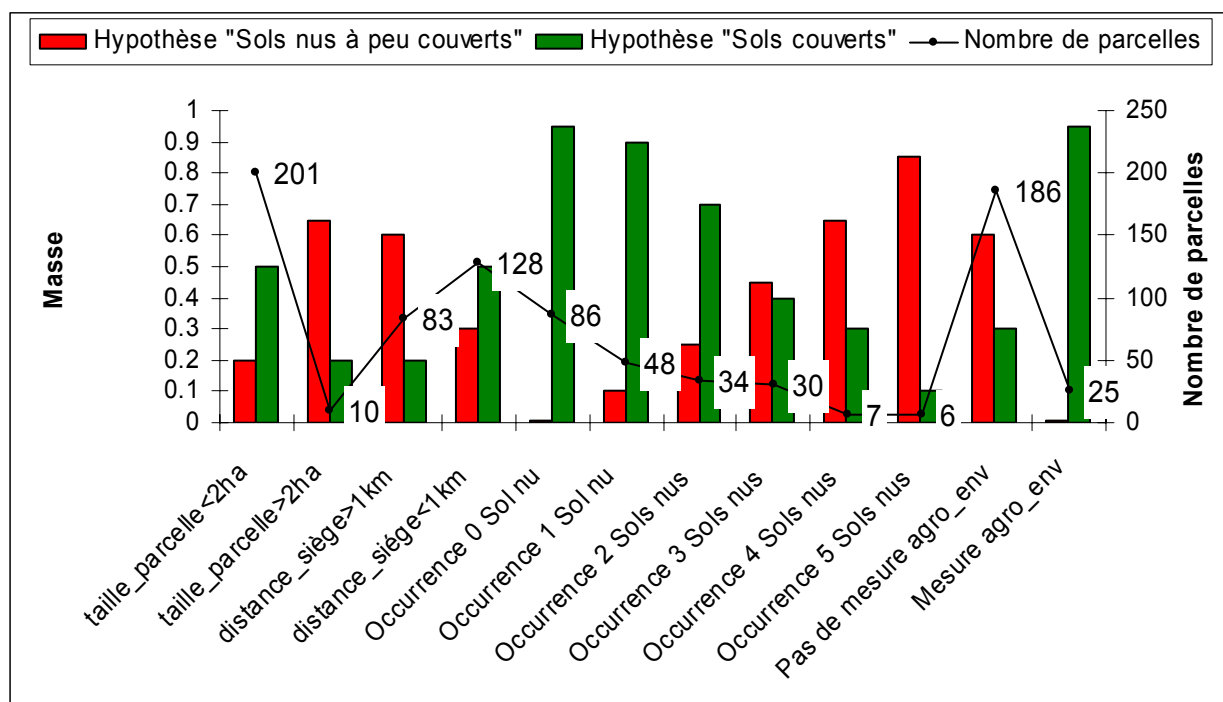


Figure 40– Répartition des jeux de masse selon les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » pour les sols couverts prédits de façon erronée avec la règle de fusion de Dempster-Shafer

-Les sols nus à peu couverts correctement prédits (Figure 41) ne couvrent que 114 des 319 ha (soit 36%) détectés par l'image satellite. Ce résultat ne provient pas d'une sous-estimation de la prédiction des sols nus à peu couverts, puisque 355 ha (avec la prise décision du maximum de probabilité pignistique) sont prédits en sols nus à peu couverts, mais d'une mauvaise affectation des sols effectivement nus à peu couverts vers la catégorie « Sols couverts ». Les prédictions correctes correspondent ici à des parcelles majoritairement

localisées à plus de 1 km du siège d'exploitation et avec des occurrences de sols nus à peu couverts importants. Ainsi, 82% des parcelles correctement prédites ont connu au moins 3 occurrences de sols nus à peu couverts sur la période d'étude. On peut également observer que la source d'information relative à la taille des parcelles n'est pas la plus informative, puisque 23 parcelles correctement détectées sont inférieures à 2 ha.

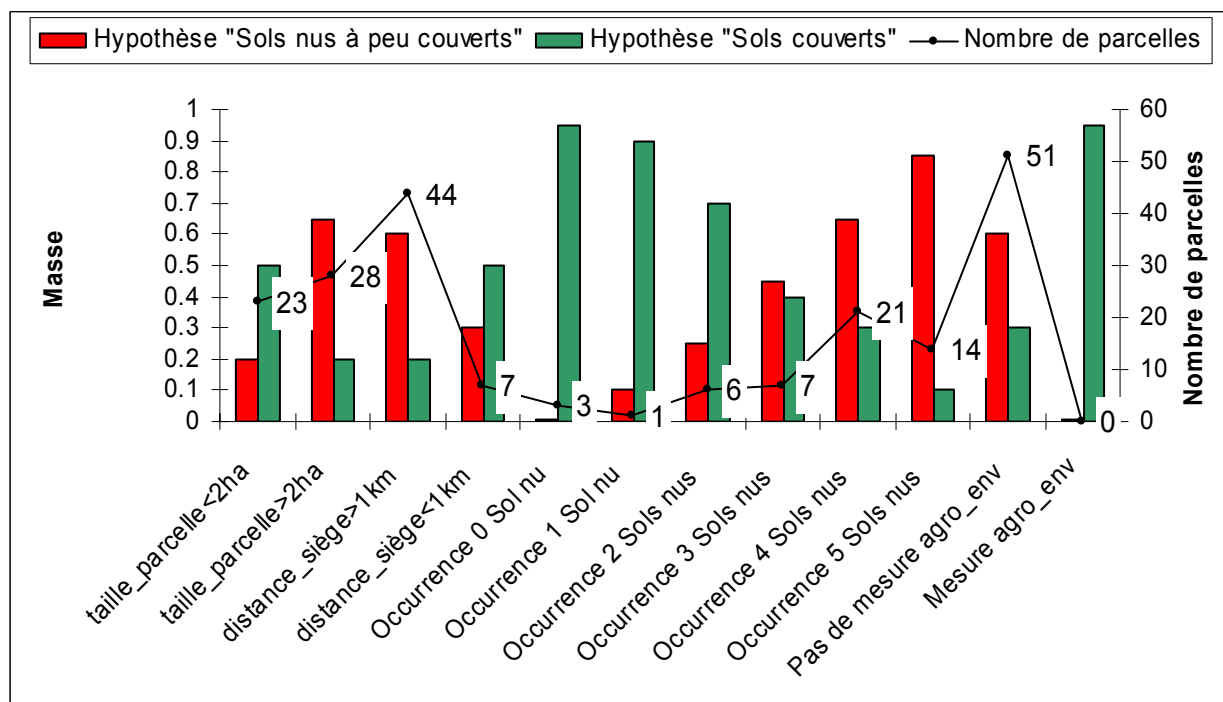


Figure 41- Répartition des jeux de masse selon les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » pour les sols nus à peu couverts correctement prédits avec la règle de fusion de Dempster-Shafer

-Les sol nus à peu couverts prédits de façon erronée concernent 142 parcelles (Figure 42). Les quatre évidences viennent ici soutenir l'hypothèse de prédiction sols nus à peu couverts. Ainsi, 121 parcelles sont situées à plus de 1 km au siège d'exploitation ; 93 parcelles ont une taille des parcelles supérieures à 2 ha, 97 d'entre elles sont caractérisées par au moins 3 occurrences de sols nus à peu couverts, et la presque totalité d'entre elles ne sont pas concernées par des mesures agro-environnementales. La fusion des jeux de masse s'orientant vers la prédiction en sols nus à peu couverts produit ainsi des mesures de croyance forte en l'hypothèse sols nus à peu couverts. Les classes des évidences « Taille de la parcelle supérieure à 2 ha » et surtout « Distance de la parcelle au siège d'exploitation supérieure à 1 km » apparaissent ici très ambiguës car elles fournissent un apport d'information pertinent dans la validation des résultats de l'hypothèse « sols nus à peu couverts » mais s'avèrent être également à l'origine de nombreuses erreurs de prédiction.

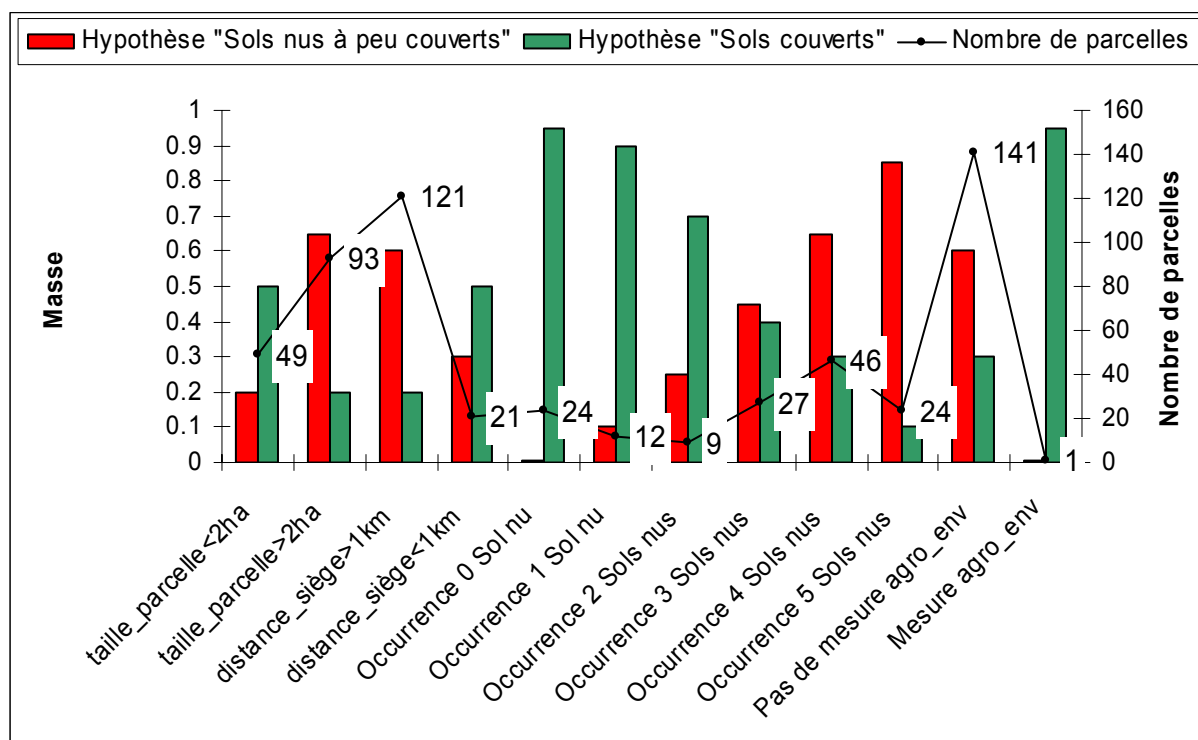


Figure 42- Répartition des jeux de masse selon les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » pour les sols nus à peu couverts prédits de façon erronée avec la règle de fusion de Dempster-Shafer

L'analyse des prédictions pour les deux hypothèses permet en premier lieu de mettre en évidence la complexité de l'évolution de la couverture hivernale des sols. Cette complexité est vérifiée par les divers types de changement de couverture des sols qui concernent à des niveaux d'intensité différents tous les types de parcelles, qu'elles soient de petite ou de grande taille, proches ou éloignées du siège d'exploitation, que les occurrences de sols nus à peu couverts soient peu ou très nombreuses, que des mesures agro-alimentaires soient en vigueur ou non.

Cependant, des tendances générales sont vérifiées, venant soutenir l'identification des facteurs de changements et leurs jeux de masse associés. Ainsi, la majorité des prédictions correctes pour l'hypothèse « Sols couverts » pour l'hiver 2001/02 concernent un parcellaire de petite taille, localisé préférentiellement à proximité des sièges d'exploitation et avec peu ou aucune occurrence de sols nus à peu couverts détectées durant le suivi. Les prédictions s'avèrent beaucoup plus délicate pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts ». Tout d'abord, les parcelles concernées sont beaucoup moins nombreuses, comparativement au nombre de parcelles qui sont effectivement couvertes en hiver sur le bassin-versant. Par ailleurs, certains facteurs de changements tendent -parfois de façon contradictoire- à valider ou infirmer cette hypothèse. L'analyse des résultats permet ainsi de mesurer la pertinence de certaines sources d'évidence. La plus informative semble être la source « Occurrence des sols nus à peu couverts », qui dans tous les cas de prédiction, reste fiable. En revanche, les évidences

« Taille des parcelles » et « Distance de la parcelle au siège d'exploitation » sont plus ambiguës. Ainsi, si la classe d'évidence « Taille de la parcelle inférieure à 2 ha » apparaît très fiable pour les sols couverts, elle génère des erreurs de prédiction pour cette même hypothèse puisque 95% des parcelles non validées ont moins de 2 ha. De même, la classe d'évidence « Distance de la parcelle au siège d'exploitation supérieure à 1 km » avec l'évidence contribue mutuellement à prédire correctement et de façon erronée l'affectation des parcelles pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts ». Ces deux évidences apparaissent ainsi comme étant principalement responsables des hauts niveaux de conflits entre toutes les sources d'information.

3.1.3.2. Application au site d'étude

La méthode d'affaiblissement des sources consiste à prendre en compte la fiabilité des évidences en appliquant un facteur d'affaiblissement (α) sur chaque source d'information tel que $\alpha \in [0,1]$. La méthode est appliquée comme suit:

$$\begin{cases} m(A) \\ m(\Theta) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} m'(A) = \alpha . m(A) & \forall A \neq \Theta \\ m'(\Theta) = (1 - \alpha) + \alpha . m(\Theta) \end{cases}$$

Le processus d'affaiblissement est appliqué lorsque le conflit entre les sources est jugé trop important (le seuillage du conflit est fixé à $k > 0.4$). Dans ce cas, deux règles ont été privilégiées :

- La première règle consiste à affecter un facteur d'affaiblissement qui ne vient pas interférer dans le processus de décision, on obtint ainsi :

$$\begin{cases} m(A) \\ m(\Theta) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} m'(A) = 0.01 & \forall A \neq \Theta \\ m'(\Theta) = 0.98 \end{cases}.$$

- La deuxième règle est liée au niveau de conflit détecté, plus le conflit est important plus le facteur d'affaiblissement est élevé.

Les facteurs d'affaiblissement sur les variables identifiées comme conflictuelles n'améliorent que très sensiblement les résultats (quelques parcelles), mais leur analyse montre que les hauts niveaux de conflit entre les sources d'information ne sont pas nécessairement présents, en particulier en ce qui concerne les prédictions erronées pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts ». L'affaiblissement des masses des évidences les plus conflictuelles

(« Taille des parcelles » et « Distance au siège d'exploitation ») n'ayant que très peu d'impact sur les résultats, une ambiguïté entre les sources d'information doit être prise en considération car certaines sources d'information comme les évidences « Taille des parcelles » et « Distance au siège d'exploitation », selon leurs classes, semblent soutenir à la fois les deux hypothèses... Cette ambiguïté peut être gérée à l'aide d'une approche récente en fusion de données qui permet d'intégrer cet aspect contradictoire ou « paradoxal » dans le processus de modélisation.

3.2. La gestion des sources d'information avec la théorie de Dezert-Smarandache

La Théorie de Dezert-Smarandache (DSmT ou Dezert-Smarandache Theory), qui peut être considérée comme une généralisation de la théorie des évidences de Demspster-Shafer, a été développée pour s'affranchir de deux limites inhérentes à la DST (Dezert et Smarandache, 2003). La première limite se situe au niveau de la définition du cadre de discernement qui dans le cas de la DST se réduit à un ensemble discret, exclusif et exhaustif, contrainte parfois trop sévère pour certaines applications. La deuxième est liée à la nature des sources d'information qui sont supposées être distinctes et indépendantes, condition qui s'avère également très difficile à respecter pour de nombreuses applications, surtout si les données utilisées ne se sont pas seulement que de type statistique.

Cette nouvelle théorie, appelée également théorie du raisonnement plausible et paradoxal, permet de représenter et combiner des sources d'informations de nature à la fois incertaines, paradoxales et imprécises au travers d'un formalisme mathématique rigoureux. La DSmT offre de nouvelles règles de fusion permettant d'intégrer formellement les contraintes d'intégrité du problème (quand elles existent) et de travailler avec n'importe quel type de modèle (modèle libre sans contrainte, modèle hybride ou modèle de Shafer). Pour notre problématique, le modèle libre est adopté puisqu'il correspond le mieux à la nature intrinsèque des hypothèses à manipuler. Dans ce cadre, la règle classique de fusion de la DSmT présente l'avantage de rester commutative et associative. Contrairement à la DST, la DSmT intègre à la base la nature possiblement paradoxale des évidences venant soutenir des hypothèses (Dezert, 2003) dès la définition du cadre de discernement. L'idée de base de la DSmT repose ainsi sur la définition d'un « hyper-power set » (treillis de Dedekind) du cadre de discernement à partir duquel sont construits des jeux de masses, des fonctions de croyance et de plausibilité. La règle classique de la fusion dans le cadre de la DSmT (correspondant en fait au consensus conjonctif sur le treillis de Dedekind) peut être justifiée par le principe de maximum d'entropie (Dezert, 2003).

3.2.1. Le principe général

3.2.1.1. Le cadre de discernement généralisé

Avec la DST, l'ensemble classique, noté 2^Θ , des parties du cadre de discernement Θ est appelé « power-set » défini dans 2^Θ . Exemple : Si Θ est composé de trois hypothèses A, B et C, on obtient :

$$\begin{aligned}\Theta &= \{A, B, C\} \\ 2^\Theta &= \{\emptyset, A, B, C, A \cup B, A \cup C, B \cup C, A \cup B \cup C\}\end{aligned}$$

Avec la DSmT, cette définition est étendue à l'expression d'un « hyper-power set » noté D^Θ de Θ comme l'ensemble de tous les éléments construits à partir des éléments de Θ avec les opérateurs ensemblistes classiques de conjonction \cap et de disjonction \cup . Ainsi, pour un cadre de discernement composé de deux hypothèses A et B, l'hyper power set est défini comme suit :

$$\begin{aligned}\Theta &= \{A, B\} \\ D^\Theta &= \{\emptyset, A, B, A \cup B, A \cap B\} \text{ et } |D^\Theta| = 5\end{aligned}$$

Pour justifier et comprendre cette approche du cadre de discernement, prenons comme exemple le cas de la couverture hivernale des sols où Θ est constitué des hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts ». Nous avons dans le chapitre 2 fait référence aux multiples états de surface de la couverture des sols (chaumes de maïs, sols totalement nus, intercultures de type CIPAN, jeune céréale d'hiver,...) dont la complexité d'identification par télédétection nous avait conduit à n'identifier que deux classes : la classe « Sols nus à peu couverts », estimée à partir du taux de couverture végétale de la parcelles, et la classe « Sols couverts » pouvant correspondre à une prairie, une interculture,... Pour notre problématique, la limite de séparation des deux classes s'avère donc pour certains cas très délicate à fixer. Par exemple, en fonction des dates de prise de vue, une parcelle peut être classée dans la catégorie « Sols nus à peu couverts » avec un taux de couverture des sols de 10 % et se retrouver classée en « Sols couverts » avec un taux de 15 % de couverture végétale. Les figures 43 et 44 montrent des exemples où l'affectation d'une parcelle à une des deux classes apparaît *a priori* problématique, les parcelles considérées pouvant apparemment être indifféremment classées en « Sol nu à peu couvert » ou en « Sol couvert ». Toutefois, une analyse détaillée de chaque situation permet de lever cette ambiguïté. Ainsi, sur la parcelle correspondant à la figure 43, selon le taux de couverture (souvent hétérogène) des repousses de végétation qui couvrent la parcelle, celle-ci par télédétection peut être affectée aux deux classes, mais d'un point d'un vu cultural, s'il n'y a aucune interculture, c'est un sol nu après céréales.



Figure 43-Repousse spontanée de la végétation sur des chaumes de céréales (Bassin-versant du Yar, hiver 2001-2002).

La figure 44 offre un autre exemple du problème d'affectation des parcelles à une des deux classes. Nous sommes ici en présence d'une interculture nécrosée par une gelée précoce en début d'hiver. Malgré un taux de couverture au sol important, cette parcelle est classée (image satellite haute résolution standard) en sols nus à peu couverts car l'activité chlorophyllienne y est quasiment nulle, alors qu'il s'agit en réalité d'une interculture totalement couvrante.



Figure 44- Interculture nécrosée par une gelée précoce (Bassin-versant du Yar, hiver 2001-2002).

D'autres exemples expriment ces disjonctions d'hypothèses. Ainsi, certaines parcelles couvertes à différents degrés par des céréales d'hiver, des jeunes intercultures où là aussi les variations « intra-hivernales » du couvert végétal peuvent être très importantes (contrainte climatique, contrainte liée à des rotations culturales,...).

La nouvelle définition du cadre de discernement proposée dans le cadre de la DSMT, appelée également cadre de discernement généralisé, s'avère pour notre thématique (et pour beaucoup d'autres) particulièrement intéressante. Elle suppose un cadre de discernement assez restreint car avec un card $(\Theta) = 6$, on obtient un hyper-powerset de 7 828 352 d'éléments générant une taille de stockage informatique d'environ 59 Mo... Dans le cas de notre application, cette approche apparaît donc totalement justifiée et permet de prendre en compte la nature complexe et ambiguë de certains types de couverts qui en hiver peuvent s'avérer nombreux.

3.2.1.2. Jeu de masse généralisé

Chaque source d'évidence β est affectée par un jeu de masse généralisé de croyance $m(.)$ défini comme la fonction de D^Θ dans $[0 ; 1]$ tel que :

$$m(\emptyset) = 0 \quad \text{et} \quad \sum_{A \in D^\Theta} m(A) = 1$$

La quantité $m(A)$ est appelée masse élémentaire de croyance généralisée en A . Le jeu de masse $m(.)$ autorise alors, contrairement au jeu de masse classiquement défini avec la DST, la pondération des informations paradoxales.

3.2.1.3. Les fonctions de croyance et de plausibilité généralisées

A partir de tout jeu de masse généralisé $m(.)$, pour tout élément de D^Θ les fonctions de croyance (Cr) et de plausibilité (Pl) peuvent être définies de la façon suivante :

$$Cr(A) = \sum_{B \in D^\Theta, B \subseteq A} m(B)$$

$$Pl(A) = \sum_{B \in D^\Theta, B \cap A \neq \emptyset} m(B)$$

Notons que contrairement à la DST, la notion de complémentarité n'a pas de sens dans la DSMT puisque le principe de tiers exclus est réfuté en autorisant la possibilité d'avoir à traiter des informations de type paradoxal telles que $\forall A \in D^\Theta, \forall B \in D^\Theta, m(A \cap B) > 0$.

Ces définitions restent cependant cohérentes avec celles que l'on peut trouver dans le cadre de la DST lorsque les sources traitées restent incertaines.

3.2.2. Les spécificités de la DSMT

3.2.2.1. La transformation pignistique généralisée

Comme dans la règle de DST, une transformation pignistique généralisée permet de construire une mesure de probabilité subjective à partir de l'ensemble de $m(\cdot)$, définie cette fois sur l'hyper-power set D^Θ . Cette transformation est réalisée comme suit (Dezert Smarandache 2004):

$$\forall A \in D^\Theta, \quad P\{A\} = \sum_{X \in D^\Theta} \frac{C_M(X \cap A)}{C_M} m(X)$$

Avec $C_M(X)$ correspondant à la cardinalité de la proposition X pour le modèle de DSMT M étudié (Smarandache et Dezert, 2004).

Cette transformation permet, comme pour la DST, de prendre une décision rationnelle (par maximum de probabilité pignistique) en fonction des masses de croyance généralisées.

3.2.2.2. La règle de fusion de Dezert-Smarandache

Considérons deux sources d'information équitablement fiables β_1 et β_2 , un cadre de discernement généralisé avec des fonctions de croyance généralisées associées $Cr_1(\cdot)$ et $Cr_2(\cdot)$ aux jeux de masse $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$. La fonction de croyance globale fusionnée définie par :

$$Cr(\cdot) = Cr_1(\cdot) \oplus Cr_2(\cdot)$$

s'obtient à partir de la combinaison des jeux de masses individuels généralisés $m_1(\cdot)$ et $m_2(\cdot)$ par la règle DSMT classique suivante :

$$\forall C \in D^\Theta, m(C) = [m_1 \oplus m_2](C) = \sum_{A, B \in D^\Theta, A \cap B = C} m_1(A) m_2(B)$$

Puisque l'hyper-power set D^Θ est clos par les opérateurs de disjonction et de conjonction, cette nouvelle règle de fusion garantie que $m(\cdot) : D^\Theta \rightarrow [0,1]$. Cette règle de fusion, comme pour la DST, conserve bien les propriétés intéressantes d'associativité et de commutativité, et peut toujours s'appliquer pour la fusion de sources de nature différente et en particulier pour la fusion de sources hautement conflictuelles dans le cadre du modèle libre,

c'est-à-dire sans contrainte d'intégrité (Dezert, 2003). La normalisation réalisée sous la DST pour mesurer le conflit entre les sources est ici inexistante, elle est, pour le cas du modèle libre adapté ici à notre problématique, directement gérée par la conjonction des hypothèses dans le cadre de la DSMT. Dans un cadre plus général, la DSMT propose une règle de fusion hybride plus générale qui permet d'intégrer les contraintes d'intégrité du problème quand elles existent (Dezert-Smarandache 2004). Cet aspect permet alors de traiter l'aspect dynamique de la fusion mais sort ici de notre contexte applicatif. Le processus de décision doit cependant faire l'objet de beaucoup d'attention. A l'instar de la DST, une technique avec un affaiblissement des masses peut aussi être utilisée lorsque les sources ne disposent pas de la même fiabilité.

3.2.2.3. Quelques exemples de fusion de données avec la DSMT

Les exemples de fusion présentés sont tirés des travaux de J. Dezert et F. Smarandache (2003). Le processus de fusion de données, comme nous allons le voir, peut gérer conjointement les données de types certaines, probabilistes, incertaines, paradoxales et imprécises. Pour plus de simplicité et une meilleure compréhension, le cadre de discernement est ici composé des hypothèses de travail Sols nus à peu couverts (S_n) et Sols couverts (S_c) avec leurs fonctions de masse associées aux sources d'information $m_1(.)$ et $m_2(.)$. Différents types de fusion sont présentés selon les niveaux de mesure des sources d'information dans le tableau 19:

	Masse pour S_n	Masse pour S_c	Incertitude	Paradoxe
Fusion de 2 sources certaines non contradictoires	$m_1(S_n)=1$ $m_2(S_n)=1$ $m(S_n)=1$	$m_1(S_c)=0$ $m_2(S_c)=0$ $m(S_c)=0$	$m_1(S_n \cup S_c)=0$ $m_2(S_n \cup S_c)=0$ $m(S_n \cup S_c)=0$	$m_1(S_n \cap S_c)=0$ $m_2(S_n \cap S_c)=0$ $m(S_n \cap S_c)=0$
Fusion de 2 sources certaines non contradictoires	$m_1(S_n)=1$ $m_2(S_n)=0$ $m(S_n)=0$	$m_1(S_c)=0$ $m_2(S_c)=1$ $m(S_c)=0$	$m_1(S_n \cup S_c)=0$ $m_2(S_n \cup S_c)=0$ $m(S_n \cup S_c)=0$	$m_1(S_n \cap S_c)=0$ $m_2(S_n \cap S_c)=0$ $m(S_n \cap S_c)=1$
Fusion d'une source certaine et d'une source paradoxale	$m_1(S_n)=1$ $m_2(S_n)=0$ $m(S_n)=0$	$m_1(S_c)=0$ $m_2(S_c)=0$ $m(S_c)=0$	$m_1(S_n \cup S_c)=0$ $m_2(S_n \cup S_c)=0$ $m(S_n \cup S_c)=0$	$m_1(S_n \cap S_c)=0$ $m_2(S_n \cap S_c)=1$ $m(S_n \cap S_c)=1$

Chapitre 3. L'approche paradoxale dans le processus de modélisation prédictive des changements de la couverture hivernale des sols

	Masse pour Sn	Masse pour Sc	Incertitude	Paradoxe
Fusion d'une source certaine et d'une source incertaine	$m_1(Sn) = 1$ $m_2(Sn) = 0$ $m(Sn) = 1$	$m_1(Sc) = 0$ $m_2(Sc) = 0$ $m(Sc) = 0$	$m_1(Sn \cup Sc) = 0$ $m_2(Sn \cup Sc) = 1$ $m(Sn \cup Sc) = 0$	$m_1(Sn \cap Sc) = 0$ $m_2(Sn \cap Sc) = 0$ $m(Sn \cap Sc) = 0$
Fusion de deux sources incertaines	$m_1(Sn) = 0$ $m_2(Sn) = 0$ $m(Sn) = 0$	$m_1(Sc) = 0$ $m_2(Sc) = 0$ $m(Sc) = 0$	$m_1(Sn \cup Sc) = 1$ $m_2(Sn \cup Sc) = 1$ $m(Sn \cup Sc) = 1$	$m_1(Sn \cap Sc) = 0$ $m_2(Sn \cap Sc) = 0$ $m(Sn \cap Sc) = 0$
Fusion d'une source incertaine et d'une source paradoxale	$m_1(Sn) = 0$ $m_2(Sn) = 0$ $m(Sn) = 1$	$m_1(Sc) = 0$ $m_2(Sc) = 0$ $m(Sc) = 0$	$m_1(Sn \cup Sc) = 1$ $m_2(Sn \cup Sc) = 0$ $m(Sn \cup Sc) = 0$	$m_1(Sn \cap Sc) = 0$ $m_2(Sn \cap Sc) = 1$ $m(Sn \cap Sc) = 1$
Fusion de deux sources de types probabilistes	$m_1(Sn) = 0,80$ $m_2(Sn) = 0,90$ $m(Sn) = 0,72$	$m_1(Sc) = 0,20$ $m_2(Sc) = 0,10$ $m(Sc) = 0,02$	$m_1(Sn \cup Sc) = 0$ $m_2(Sn \cup Sc) = 0$ $m(Sn \cup Sc) = 0$	$m_1(Sn \cap Sc) = 0$ $m_2(Sn \cap Sc) = 0$ $m(Sn \cap Sc) = 0,26$
Fusion de deux sources incertaines	$m_1(Sn) = 0,80$ $m_2(Sn) = 0,90$ $m(Sn) = 0,805$	$m_1(Sc) = 0,15$ $m_2(Sc) = 0,05$ $m(Sc) = 0,0175$	$m_1(Sn \cup Sc) = 0,05$ $m_2(Sn \cup Sc) = 0,05$ $m(Sn \cup Sc) = 0,0025$	$m_1(Sn \cap Sc) = 0$ $m_2(Sn \cap Sc) = 0$ $m(Sn \cap Sc) = 0,175$
Fusion de deux sources paradoxales	$m_1(Sn) = 0,80$ $m_2(Sn) = 0,90$ $m(Sn) = 0,72$	$m_1(Sc) = 0,15$ $m_2(Sc) = 0,05$ $m(Sc) = 0,0075$	$m_1(Sn \cup Sc) = 0$ $m_2(Sn \cup Sc) = 0$ $m(Sn \cup Sc) = 0$	$m_1(Sn \cap Sc) = 0,05$ $m_2(Sn \cap Sc) = 0,05$ $m(Sn \cap Sc) = 0,2725$
Fusion de deux sources incertaines et paradoxales	$m_1(Sn) = 0,80$ $m_2(Sn) = 0,90$ $m(Sn) = 0,805$	$m_1(Sc) = 0,10$ $m_2(Sc) = 0,05$ $m(Sc) = 0,0175$	$m_1(Sn \cup Sc) = 0,05$ $m_2(Sn \cup Sc) = 0,03$ $m(Sn \cup Sc) = 0,0025$	$m_1(Sn \cap Sc) = 0,05$ $m_2(Sn \cap Sc) = 0,02$ $m(Sn \cap Sc) = 0,199$

Tableau 19- Exemples de fusion de données avec la théorie de Dezert-Smarandache (DSmT « classique »)

Le détail des calculs pour chaque hypothèse n'est ici pas réalisé pour des raisons de place. A titre d'exemple, le résultat détaillé de la disjonction des hypothèses pour le dernier exemple de fusion (entre deux sources incertaines et paradoxales) est le suivant :

- $m(S_n \cap S_c) = [m_1(S_n) \cdot m_2(S_c)] + [m_2(S_n) \cdot m_1(S_c)] + [m_1(S_n \cap S_c) \cdot m_2(S_n)] + [m_1(S_n \cap S_c) \cdot m_2(S_c)] + [m_1(S_n \cap S_c) \cdot m_2(S_n \cup S_c)] + [m_2(S_n \cap S_c) \cdot m_1(S_n)] + [m_2(S_n \cap S_c) \cdot m_1(S_c)] + [m_2(S_n \cap S_c) \cdot m_1(S_n \cup S_c)] + [m_1(S_n \cap S_c) \cdot m_2(S_n \cap S_c)]$
- $m(S_n \cap S_c) = 0,04 + 0,09 + 0,045 + 0,0025 + 0,0015 + 0,016 + 0,002 + 0,001 + 0,001$
- $m(S_n \cap S_c) = 0,199$

On remarque, suite à ces exemples de fusion de sources de différente nature, que dans le cas de la fusion de deux sources incertaines, le conflit est reporté sur la disjonction des hypothèses. L'exemple de Zadeh (partie 3.1.1.) qui mettait en évidence les limites de la DST lorsque les données sont très fortement conflictuelles est ici analysé avec la DSMT. Rappelons que le cadre de discernement est composé de 3 hypothèses de diagnostic correspondant à l'origine de la maladie : {une Tumeur (T), une Contusion (C), une Méningite (M)}, avec l'affectation de jeux de masse suivant :

$$\begin{array}{ll} m_1(M) = 0,99 & ; \quad m_1(T) = 0,01 \\ m_2(C) = 0,99 & ; \quad m_2(T) = 0,01 \end{array}$$

L'application de la règle de combinaison de la DSMT a déterminé que la probabilité la plus forte de diagnostic serait la Méningite ET la Contusion, puisque l'on obtient les résultats suivants :

$$m(M \cap C) = 0,9801 ; m(M \cap T) = 0,0099 ; m(M \cap C) = 0,00099 ; m(T) = 0,0001$$

Ces résultats sont donc beaucoup plus cohérents que ceux qui sont obtenus avec la DST qui identifiait de façon certaine une tumeur.

La justification mathématique de l'ensemble de la théorie est présentée dans « Advances and Applications of DSMT for Information Fusion », Smarandache et Dezert, 2004). Des applications y sont également développées, illustrant la capacité mathématique de cette nouvelle théorie à préserver la cohérence de la fusion, quelque soit le degré de conflit entre les sources.

3.3. Application de la DSMT à la prédiction de la couverture hivernale des sols

L'application de la DSMT à la prédiction de la couverture hivernale apparaît pertinente car les données utilisées pour modéliser la prédiction du couvert hivernal sont hautement

conflictuelles et peuvent, dans certains cas, apparaître paradoxales. Par ailleurs, la définition d'un cadre de discernement généralisé s'avère également utile pour notre problématique dans le sens où la séparation des classes « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » n'est pas toujours évidente, comme nous avons pu le constater. Cette application est réalisée en deux étapes : la première vise à comparer les performances de la DST et de la DSMT avec l'introduction de la notion du paradoxal dans l'affectation des jeux de masse pour chaque ensemble de l'hyper-powerset ; La deuxième étape examine différents niveaux d'analyse pour améliorer l'affectation des jeux de masse de l'hyper-powerset défini par la théorie de Dezert-Smarandache, afin d'améliorer la prédiction de l'hypothèse « Sols nus à peu couverts ».

3.3.1. Le cadre de travail

La méthodologie du processus de modélisation de la couverture hivernale des sols est exposée dans la figure 45. La théorie du plausible et du paradoxal de Dezert-Smarandache intervient ici au niveau de la définition du cadre de discernement, où un sous-ensemble est ajouté au power set de la DST, pour former l'hyper-power set. Cette prise en compte du paradoxal dans le cadre de discernement se répercute dans l'affectation des fonctions de masse pour chaque élément de l'hyper-power set qui, avec deux hypothèses, est composé de 5 sous-ensembles (Dans le cas de notre application, il s'agit des ensembles « Sols nus à peu couverts », « Sols couverts », « Sols nus à peu couverts \cap Sols couverts », « Sols nus à peu couverts \cup Sols couverts », « \emptyset »).

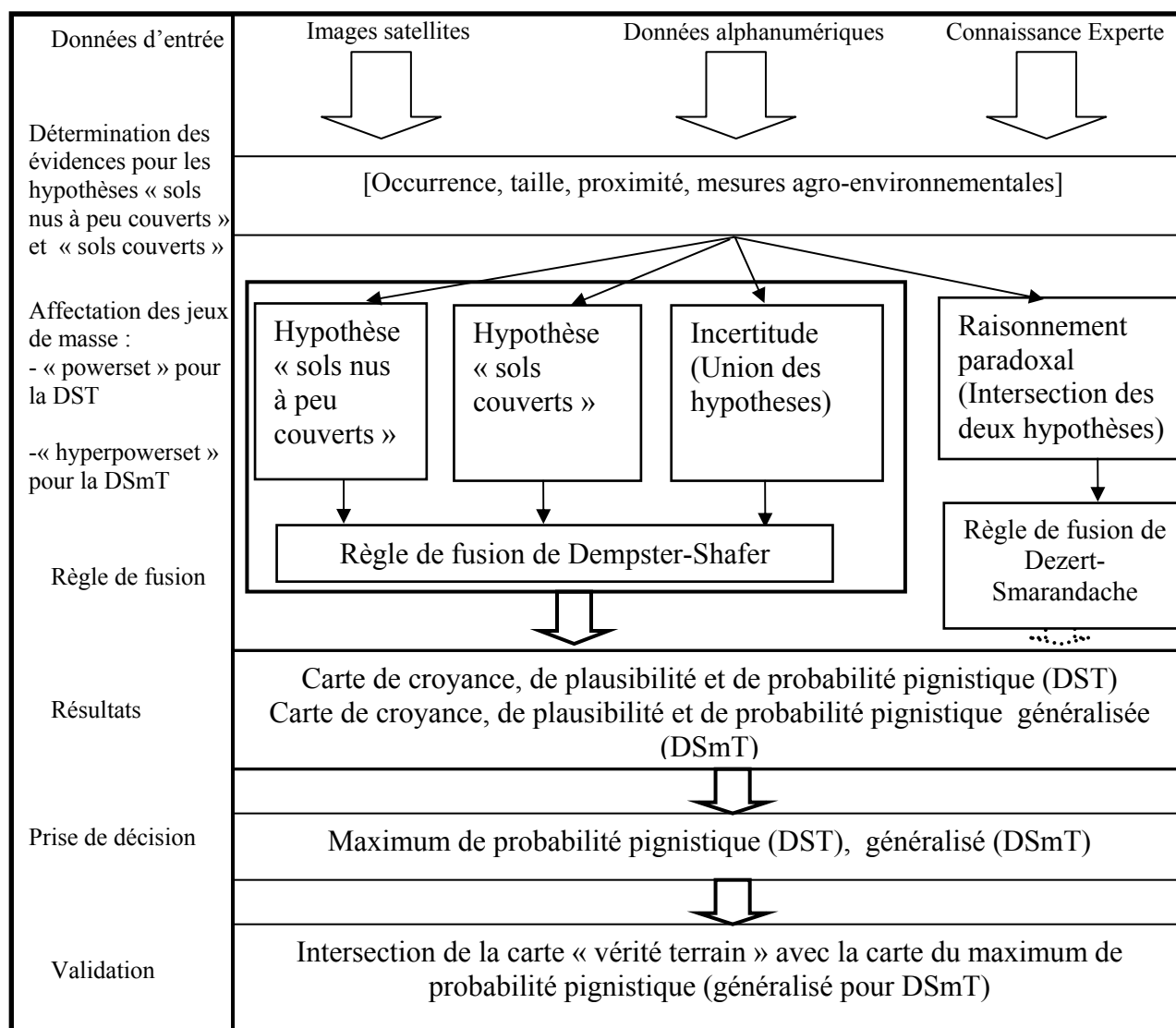


Figure 45- Processus de modélisation prédictive de l'évolution de la couverture hivernale des sols avec les théories de Dempster-Shafer et Dezert-Smarandache

L'ensemble des fonctions de masses pour ces 5 sous-ensembles est combiné à travers la règle de fusion généralisée de Dezert-Smarandache et, comme dans le cas de la théorie des évidences, trois types de mesures de crédibilité -dites « généralisées » pour les différencier de la DST- sont spatialement représentés : La croyance, la plausibilité et la probabilité pignistique. La prise de décision est ensuite réalisée par le maximum de probabilité pignistique calculée sur les ensembles de l'hyper-powerset. Les prédictions effectuées pour chaque hypothèse sont enfin et confrontées avec la réalité du terrain de l'occupation des sols de l'année étudiée à travers l'utilisation de classifications obtenues *a posteriori* à partir d'images satellitaires.

3.3.2. Application et optimisation de la DSMT sur le bassin versant du Yar

Dans un premier temps, la théorie de Dezert-Smarandache est appliquée à des fins de validation et de comparaison avec les résultats de la théorie de Dempster-Shafer. Dans un deuxième temps, différentes options d'optimisation de la DSMT sont testées et analysées (Corgne *et al.*, 2003).

3.3.2.1. Utilisation de la théorie de la DSMT pour la prédiction des changements de la couverture hivernale des sols

La procédure utilisée pour identifier les facteurs de changements de la couverture hivernale sur le bassin versant du Yar ayant été exposée dans le deuxième chapitre, le processus de modélisation est ici directement analysé au niveau de l'étape de la définition du cadre de discernement. Ce dernier est appelé cadre de discernement généralisé car la notion paradoxale est introduite, ce qui génère, comme nous l'avons vu précédemment, un ensemble de proposition D^Θ dénommé « hyper-power set ». Pour la prédiction de la couverture hivernale des sols, deux hypothèses sont envisagées avec DST : « Sol couvert » et « Sol nu à peu couvert », la disjonction des deux hypothèses indiquant l'incertitude dans l'évolution du couvert hivernal. Avec la DSMT, on considère dorénavant que la parcelle peut évoluer en sols couverts (Sc), en sols nus à peu couverts (Sn), en sols nus à peu couverts OU en sols couverts (disjonction des hypothèses) ou en sols nus à peu couverts ET en sols couverts (conjonction des hypothèses). Cette modélisation du cadre de discernement (i.e. adoption du modèle libre), totalement justifiée pour notre problème, correspond donc à :

$$\begin{aligned}\Theta &= \{Sc, Sn\} \\ D^\Theta &= \{\emptyset, Sc, Sn, Sc \cup Sn, Sc \cap Sn\}\end{aligned}$$

A partir de la définition de ce cadre de discernement, une nouvelle affectation de masse est effectuée sur la totalité des ensembles de l'hyper-power set (Tableau 20). Etant donné le haut degré de conflit entre les sources d'information, cette première approche consiste à affecter les fonctions de masse attribuées à l'union des hypothèses sur le paradoxe.

Les calculs classiques des mesures de crédibilité (croyance, plausibilité, probabilité pignistique) prennent en compte l'apport du paradoxal dans l'hyper-power set, et sont dites généralisées. Comme pour la DST, la prise de décision réalisée à partir du maximum de probabilité pignistique est confrontée à la classification de l'image satellitaire de l'hiver 2001/2002.

Facteurs	Classes	Hypothèse Sols nus à peu couverts	Hypothèse Sols couverts	Incertitude	Paradoxe
Distance par rapport au siège d'exploitation	1 : {parcelles < 1 km du siège d'exploitation}	0,30	0,50	0	0,20
	2 : {parcelles > 1 km du siège d'exploitation}	0,60	0,20	0	0,20
Mesures agro-environnementales	1 : {parcelles sans mesures agro-environnementales}	0,60	0,30	0	0,10
	2 : {parcelles sans mesures agro-environnementales}	0,005	0,95	0	0,045
Taille des parcelles	1 : {parcelles < 2 ha}	0,20	0,50	0	0,30
	2 : {parcelles > 2 ha}	0,65	0,20	0	0,15
Occurrence des sols nus à peu couverts (1996-2001)	1 : {sols couverts tous les hivers}	0,005	0,95	0	0,045
	2 : {sols nus à peu couverts durant 1 hiver}	0,01	0,90	0	0,09
	3 : {sols nus à peu couverts durant 2 hivers}	0,25	0,70	0	0,05
	4 : {sols nus à peu couverts durant 3 hivers}	0,45	0,40	0	0,15
	5 : {sols nus à peu couverts durant 4 hivers}	0,65	0,30	0	0,05
	6 : {sols nus à peu couverts durant 5 hivers}	0,85	0,10	0	0,05

Tableau 20- Affectation des jeux de masses pour chaque hypothèse avec DSMT

-Analyse des résultats :

La comparaison des résultats issus des deux théories est présentée dans le tableau 21.

Ils mettent tout d'abord en évidence que la précision globale de la prédiction effectuée avec la DSMT pour les deux hypothèses est supérieure à celle issue de la DST, puisqu'elle atteint 75,9 % dans le premier cas contre 72.6% dans le second. Ainsi, pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts », l'estimation des surfaces totalise 406 ha avec la DST –estimation déterminée à partir du maximum de probabilité pignistique-, tandis qu'elle atteint respectivement 319ha et 363ha lorsqu'elle est réalisée à partir de la classification de l'image satellite, et avec la DSMT. La tendance est la même pour l'hypothèse sols couverts où la prédiction est de 1436 ha pour une estimation de 1480 ha.

Ils montrent ensuite que la principale contribution de la DSMT concerne l'amélioration spatiale de la prédiction, et ceci pour les deux hypothèses. L'affectation spatiale des surfaces prédites avec les deux théories, validée, à partir de la classification de l'image satellitaire de l'hiver 2001-2002, montre là encore la supériorité de la DSMT sur la DST. Les taux de surfaces bien affectées passent ainsi de 80,6 pour la DST à 84,05% pour la DSMT pour l'hypothèse « Sols couverts », et de 35,7 à 38% pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts ». Toutefois, le niveau de prédiction correct pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts » reste encore beaucoup trop faible. Les parcelles mal prédites, comme dans le cas de la DST, correspondent majoritairement à des parcelles caractérisées par 5 hivers en sols couverts et qui ont été réintégrées dans un nouveau cycle de successions culturales à partir de l'année 2001/2002. Ce type de changement reste très problématique à modéliser car les prairies temporaires ont des durées très variables, dépendant largement du mode de gestion de chacun des exploitants agricoles. Enfin, de très nombreuses petites parcelles sont également mal prédites pour les deux hypothèses. Les erreurs de prédiction peuvent, dans ce cas, s'expliquer par différentes raisons : regroupements de parcelles pour implanter ou préparer une nouvelle culture, des retournements de prairies, etc....

	Occupation du sol pour l'hiver 2001/2002 (image satellite)	Théorie de Dempster-Shafer		Théorie de Dezert-Smarandache	
		Prédiction	Prédiction correcte	Prédiction	Prédiction correcte
Sols nus à peu couverts	319 ha	406 ha	114 ha (35,7%)	363 ha	121 ha (38%)
Sols couverts	1480 ha	1393 ha	1193 ha (80,6%)	1436 ha	1244 ha (84,05%)
TOTAL	1799 ha	1799 ha	1307 ha (72,65%)	1799 ha	1365 ha (75,9%)

Tableau 21- Résultats de la règle de fusion de Dempster-Shafer et de Dezert-Smarandache

3.3.2.2. Optimisation de la théorie de la DSMT pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts »

Deux voies sont explorées dans cette partie afin d'optimiser le processus de modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar avec la DSMT.

La première concerne l'affectation des jeux de masse pour chaque hypothèse. Réalisée à partir de l'analyse de la distribution des sources d'information pour chaque hypothèse (Figure 46 et 47) et à dire d'expert, les classes des différentes évidences ont été, jusqu'à présent, affectées de valeurs discrètes. Cependant, certaines évidences, par leurs caractéristiques, nécessitent une affectation moins « dure » -ou plus approximative- des fonctions de masse. C'est le cas pour les deux évidences « Taille des parcelles » et « Proximité du siège d'exploitation ». Pour la première, deux classes avaient été définies : les parcelles inférieures à 2 ha et les parcelles supérieures à 2 ha. Cependant, après l'analyse de la répartition statistique des tailles des parcelles et de la distance séparant les parcelles des sièges d'exploitation, il apparaît qu'une affectation des jeux de masse de type floue sur ces parcelles apparaît pertinente. Par exemple, pour l'évidence « Taille des parcelles », la taille peut évoluer de 0,05 ha à 7,7 ha, une affectation de masse de type continue, respectant les bornes inférieures et supérieures définies par les experts apparaît ici préférable à un seuillage effectué « à l'emporte-pièce ». Ainsi, suite à cette analyse, le seuil de la taille des parcelles a été redéfini à 1,5 ha (Figure 46). Pour l'évidence « Distance au siège d'exploitation », une affectation de type floue a également été réalisée à partir de l'analyse de la distance séparant le centre de chaque parcelle au siège d'exploitation qui lui est associé. L'analyse, dans ce cas aussi, a légèrement modifiée la limite qui avait été définie par affectation « dure », il est ainsi redéfini à 1,5 Km (Figure 47).

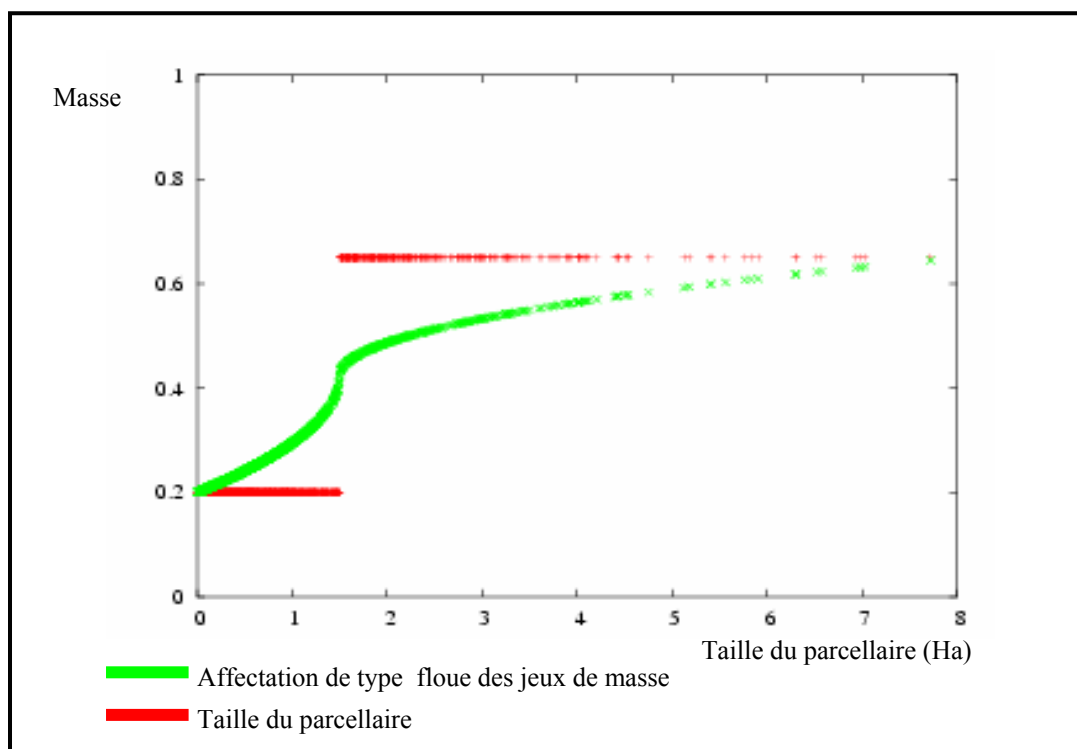


Figure 46- Affectation de fonctions de masse de type floue pour l'évidence « Taille des parcelles »

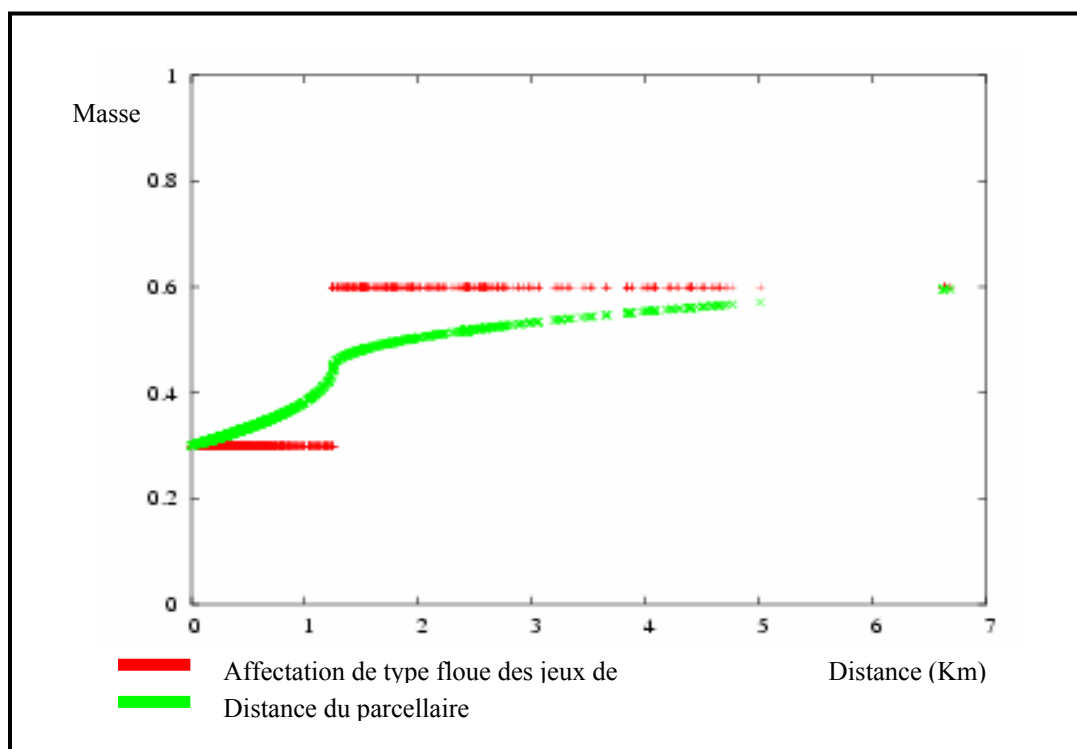


Figure 47- Affectation de fonctions de masse de type floue pour l'évidence « Distance au siège des exploitations »

La deuxième voie d'amélioration porte sur la règle de fusion de DS_mT. Sachant que les mauvaises décisions prises pour les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » ne sont pas obligatoirement liées à des hauts niveaux de conflits entre les sources d'information utilisées, une règle dite « contextuelle mixte » utilisant la DST et la DS_mT a été élaborée afin d'examiner l'ambiguïté ou le caractère paradoxal des sources, qui s'exprime dans le cas où une même source d'information soutient indifféremment deux ou plusieurs hypothèses. Ainsi, différentes règles de passage de la DST vers la DS_mT ont été expérimentées par affaiblissement et/ou transfert de l'incertain vers le paradoxe.

Suite aux analyses réalisées sur le conflit (partie 3.1.1.), différentes évidences utilisées dans la règle de fusion de la DST et de la DS_mT sont considérées comme fortement conflictuelles pour la DST et très ambiguës pour la DS_mT. Ainsi, on considère dans tous les cas que l'évidence « Taille des parcelles » est totalement paradoxale lorsque la masse assignée à l'hypothèse « sols nus à peu couverts » est inférieure à 0,25 (soit 1,5 ha, avec la nouvelle affectation des masses utilisant une affectation de fonctions de masse de type floue). L'évidence « Proximité du siège d'exploitation » est considérée comme ambiguë ou paradoxale lorsque la masse affectée pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts » est inférieure à 0,45 (soit inférieure à 1 ha). Une modification des jeux de masses initialement déterminés dans le cadre de la DST est alors effectuée dans les cas suivants :

- si la fusion de la DST fournit une probabilité pignistique pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts » supérieure à la probabilité pignistique de l'hypothèse « Sols couverts », les classes 2, 3 et 4 de l'évidence « Occurrence des sols nus à peu couverts » deviennent paradoxales.
- si la fusion de la DST fournit une probabilité pignistique pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts » inférieure à la probabilité pignistique de l'hypothèse « sols couverts », les classes 0 et 1 de l'évidence « Occurrence des sols nus à peu couverts » deviennent paradoxales (exemple : Tableau 22).

Lorsqu'une évidence est considérée comme paradoxale, toutes les masses sont affectées à l'hypermultiplicité tel que $m(\theta_1 \cap \theta_2) = 1$

Facteurs	Classes	Hypothèse Sols nus à peu couverts	Hypothèse Sols couverts	Incertitude (Union des deux hypothèses)	Paradoxe (Intersection des hypothèses)
Distance par rapport au siège d'exploitation	1 {parcelles < 1,5 km du siège d'exploitation}	0	0	0	1
	2 {parcelles > 1,5 km du siège d'exploitation}	0.60	0.20	0.20	0
Mesures agro-environnementales	1 {parcelles sans mesures agro-environnementales}	0.60	0.30	0.10	0
	2 {parcelles sans mesures agro-environnementales}	0.005	0.95	0.045	0
Taille des parcelles	1 {parcelles < 1,5ha}	0	0	0	1
	2 {parcelles > 1,5 ha}	0.65	0.20	0.15	0
Occurrences des sols nus à peu couverts (1996-2001)	1 {sols couverts tous les hivers}	0.005	0.95	0.045	0
	2 {sols nus à peu couverts durant 1 hiver}	0.01	0.90	0.09	0
	3 {sols nus à peu couverts durant 2 hivers}	0.25	0.70	0.05	0
	4 {sols nus à peu couverts durant 3 hivers}	0	0	0	1
	5 {sols nus à peu couverts durant 4 hivers}	0	0	0	1
	6 {sols nus à peu couverts durant 5 hivers}	0	0	0	1

Tableau 22 - Affectation des jeux de masse au modèle de type « mixte » pour les parcelles inférieures à 1 ha et à 1 km, pour une prise décision avec DST en « Sols couverts ».

L'application de la règle « mixte » issue de Dempster-Shafer et de Dezert-Smarandache fournit de meilleurs résultats pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts » avec 60% de la surface estimée par l'image satellite étant correctement estimés (Tableau 23). Ce taux analysé à la parcelle descend à 43%. En revanche, le taux de prédiction pour l'hypothèse « sols couverts » baisse pour atteindre 73% de prédiction validée malgré 82% du parcellaire correctement prédit illustrant la taille généralement réduite des parcelles en sols couverts sur le Yar.

	Occupation du sol pour l'hiver 2001/02 (image satellite)	Théorie de Dezert- Smarandache
		Prédiction correcte
Sols nus à peu couverts	319 ha 262 parcelles	185 ha (60%) 113 parcelles (43%)
Sols couverts	1480 ha 1594 parcelles	1085 ha (73%) 1303 parcelles (82%)
TOTAL	1799 ha 1856 parcelles	1270 ha (70.5%) 1416 parcelles (76%)

Tableau 23- Prédiction de la couverture hivernale des sols avec la règle mixte contextuelle de Dezert-Smarandache

La distribution spatiale des résultats peut être analysée à travers la figure 48. A l'instar des résultats issus de la DST, les erreurs de prédiction sont concentrées sur la partie ouest du bassin versant. Cette dernière correspond à la partie la plus intensive du bassin versant, là où les changements de la couverture hivernale des sols entre les hivers sont les plus fréquents et les plus difficiles à prédire, car majoritairement dépendants des contraintes économiques. La partie sud du bassin versant est quant à elle caractérisée par des systèmes de production de type « laitier » dont les changements sont mieux connus, et où une large part de la SAU (Surface Agricole Utile) est consacrée aux prairies permanentes et temporaires. Leur prédiction est donc plus simple à réaliser et le niveau de prédiction atteint est meilleur, même si de mauvaises prédictions sont également produites en raison de changements inopinés de couverture des sols notamment dans le cadre de retournements de prairies.

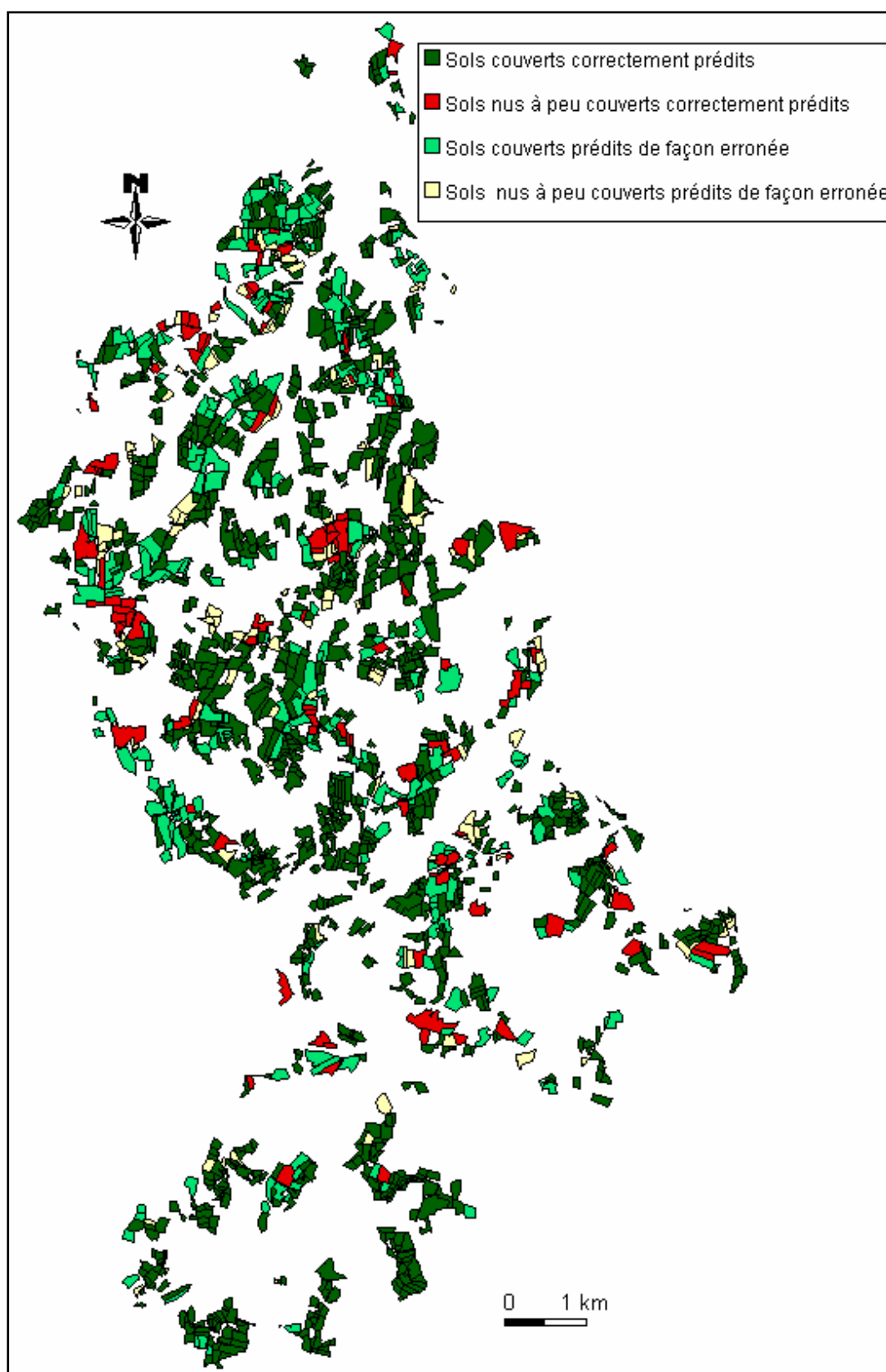


Figure 48- Distribution spatiale de la validation des prédictions pour les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols Couverts »

Conclusion

La gestion du conflit avec la règle de fusion de Dempster-Shafer s'avère pour notre application délicate. Les différentes méthodes d'affaiblissement du conflit n'ayant en effet pas apportées de résultats probants malgré l'identification des évidences à l'origine de ce haut degré de conflit sur l'ensemble du parcellaire à modéliser. Une approche novatrice visant à considérer ces sources d'informations comme non seulement conflictuelles mais également ambiguës ou « paradoxales » apparaît alors justifiée dans notre contexte. Pour gérer cet aspect, *l'application de la récente théorie de Dezert-Smarandache (2003)* apparaît alors pertinente car elle autorise à travers un cadre de discernement dit généralisé l'introduction d'un nouveau sous-ensemble déterminé à partir de la disjonction des hypothèses retenues. Cette disjonction d'hypothèse permet de formaliser le fait que *certaines sources d'évidence peuvent soutenir mutuellement les deux hypothèses étudiées*, en l'occurrence dans le cadre de cette application l'hypothèse « Sols nus à peu couverts » et l'hypothèse « Sols couverts ». Les résultats de prédiction de la couverture hivernale des sols obtenus avec la DSMT pour le système de production « bovin-mixte » sur le bassin versant du Yar sont légèrement meilleurs que ceux qui ont été produits avec la DST, et ceci pour les deux hypothèses considérées. Toutefois, les résultats obtenus pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts » étant encore insuffisants, une amélioration du modèle de DSMT a été recherchée. Elle a d'abord consisté à modifier le mode d'affectation des jeux de masse, qui pour deux évidences sont à présent réalisées à partir de règles floues bien adaptées aux données continues. Une règle de décision dite « contextuelle » et « mixte » (DST et DSMT) a ensuite été utilisée en prenant en compte l'ambiguïté des sources utilisées dans le processus de prédiction. *Les résultats obtenus pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts » ont été nettement améliorés* (60% des sols nus à peu couverts prédits l'étaient effectivement, ce qui représente 43% des parcelles sans couvert végétal cet hiver-là). Toutefois, une baisse notable du taux de bonnes prédictions avec cette méthode contextuelle-mixte est constatée pour l'hypothèse « Sols couverts », puisqu'il passe de 84% à 73%. La prédiction globale au niveau parcellaire s'élève malgré tout à 82% avec cette méthode, la prédiction étant correcte pour 1303 parcelles sur 1594 en considérant les deux hypothèses ; cette approche apparaît ainsi préférable pour déterminer avec plus de précision les « Sols nus à peu couverts », qui constituent un enjeu environnemental clé sur ce bassin versant.

Chapitre 4

Simulations prédictives de l'occupation hivernale
des sols au-delà du site expérimental

Les simulations de l'évolution de la couverture hivernale des sols ont jusqu'à présent été réalisées sur un site d'étude expérimental, le bassin versant du Yar, sur lequel existe une base de données substantielle, comprenant des séries multitemporelles d'images satellitaires, des données vectorielles, de nombreuses enquêtes terrain.... De plus, le processus de modélisation prédictive a été élaboré en étroite collaboration avec des experts du monde agricole. Sur ce site, les prédictions d'évolution de la couverture hivernale des sols à court terme, pour l'hiver suivant, s'avèrent globalement satisfaisantes puisqu'en moyenne sur les différentes expérimentations plus de 70% du parcellaire est correctement prédit, avec les règles de fusion de Dempster-Shafer (DST) et de Dezert-Smarandache (DSmT), pour les deux hypothèses « sols nus à peu couverts » et « sols couverts ».

Cependant, afin d'évaluer la reproductibilité de l'approche modélisatrice développée initialement sur le bassin versant du Yar, il apparaît nécessaire de l'appliquer sur un espace géographique plus étendu, où les dynamiques de changements hivernaux sont moins bien identifiées, où les données disponibles sont moins nombreuses, et sur lequel les connaissances des experts, souvent moins approfondies sur de larges secteurs, ne sont pas ou peu mobilisées.

L'objectif de ce chapitre consiste donc à réitérer le processus de modélisation prédictive dans un contexte « standard » éloigné de celui du bassin versant expérimental, afin d'évaluer l'intérêt de l'utilisation de l'approche modélisatrice développée dans les deux chapitres précédents.

Le choix d'un nouveau terrain d'étude, pour effectuer une modélisation prédictive de l'évolution de la couverture hivernale des sols, s'est logiquement porté sur un bassin versant où la problématique de la qualité de l'eau représente un enjeu important. Après avoir présenté les caractéristiques du site retenu, une analyse des changements de couverture hivernale de ce site est ensuite effectuée, permettant l'identification des facteurs qui ont motivé les changements observés. Enfin, à partir de ces analyses, le processus de modélisation prédictive utilisé dans les chapitres précédents est réitéré en l'adaptant en fonction des données disponibles, et les résultats issus des deux règles de fusion d'information utilisées dans les parties précédentes, c'est-à-dire de la DST et de la DSmT sont commentés.

4.1. Présentation du site d'étude et des données

Le choix du nouveau terrain d'étude s'est porté sur le bassin versant du Scorff, localisé à l'ouest du Morbihan. Couvrant une surface d'environ 500 km², il alimente en eau potable près de 80 000 habitants faisant de la qualité de l'eau sur le bassin un enjeu sanitaire de premier ordre.

Cette première partie se focalise ainsi sur le problème environnemental majeur de l'espace étudié, c'est-à-dire la qualité de l'eau, fortement liée au contexte agricole du bassin versant. Les données utilisées pour effectuer l'analyse des changements de la couverture hivernale puis sa modélisation prédictive sont ensuite brièvement exposées.

4.1.1. La qualité de l'eau sur le bassin versant du Scorff

Le bassin versant du Scorff, localisé à l'ouest du Morbihan s'étend sur 482 km² et couvre 30 communes (dont 3 communes finistériennes et 2 communes des Côtes d'Armor, Figure 49). Première source d'approvisionnement en eau potable, la ressource en eau du Scorff est exploitée par 3 syndicats de communes (Tableau 24).

Syndicat producteur	Communes Concernées	Nombre de consommateurs	Volume produit
Guéméné-sur-Scorff	Guéméné-sur-Scorff, Langoelan, Lignol, Locmalo, Persquen, Ploerdut	5500	250 000 m ³ /an
Pont-Scorff	Calan, Cléguer, Gestel, Guidel, Pont-Scorff, Queven	25 000	1,3 millions de m ³ /an
Lorient-Lanester	Lorient- Ouest	50 000	3,2 millions de m ³ /an
Total		80 000	4,75 millions de m³/an

Tableau 24- Approvisionnement en eau potable (Source : David, 1999)

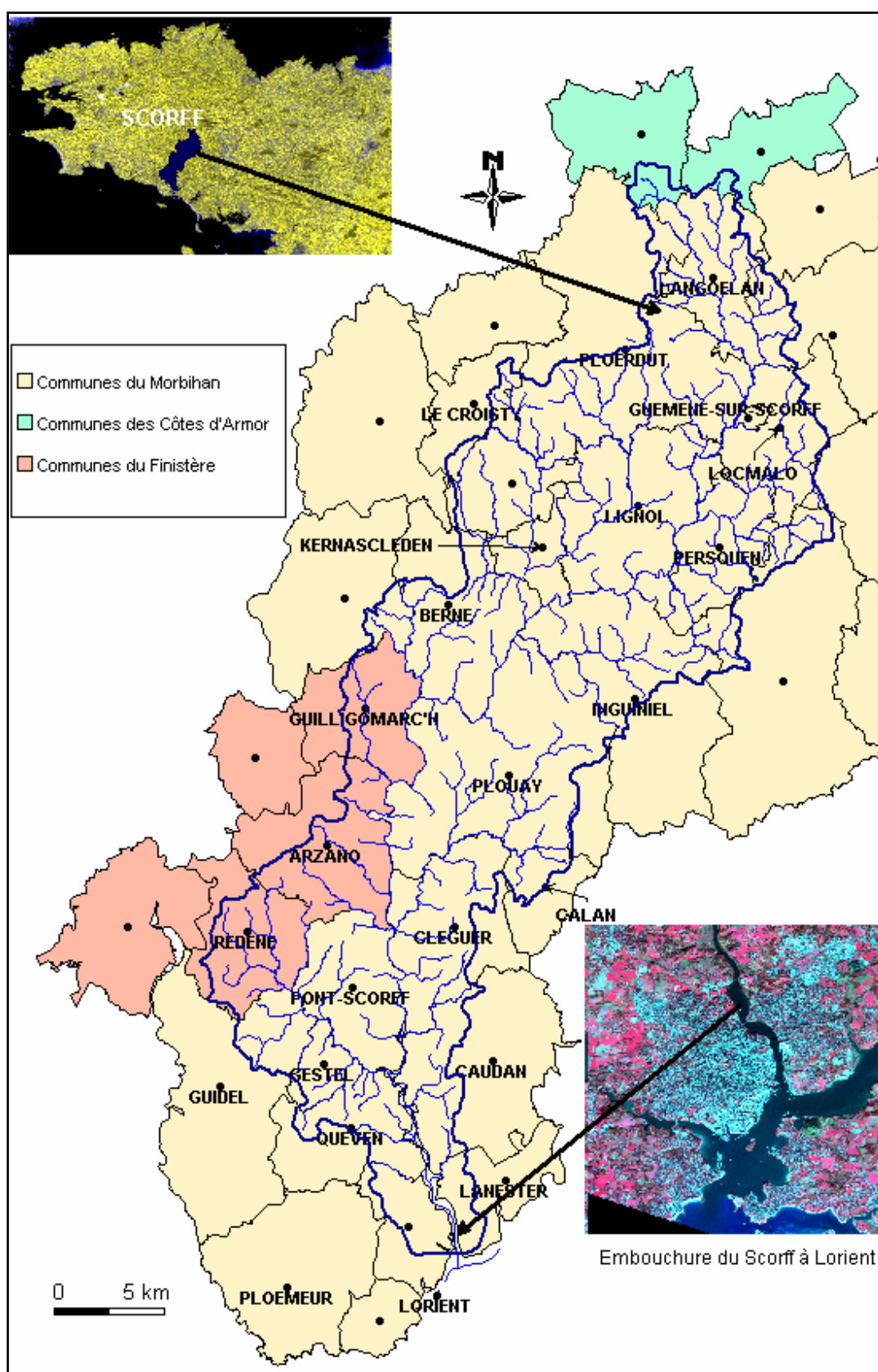


Figure 49- Localisation du bassin versant du Scorff

La qualité de l'eau sur le bassin versant constitue un enjeu sanitaire considérable et fait l'objet de plusieurs programmes de suivi. Dès 1991, le syndicat mixte du bassin versant du Scorff en partenariat avec l'Etat, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, les Conseils Généraux du Morbihan et du Finistère et le Conseil Régional, lançait un contrat de vallée visant entre autres à préserver et améliorer les ressources en eau. En 1998, le bassin versant du Scorff est désigné comme bassin versant d'action renforcée dans le cadre du programme de Bretagne Eau Pure II, et reconnu pour sa forte valeur écologique, le site « Rivières du Scorff et de la Sarre, Forêt de Pont-Calleck » est proposé pour faire partie du réseau « Natura 2000 » (Syndicat du Scorff, 2004). Le syndicat mixte du bassin versant du Scorff en est le principal acteur sur le terrain, regroupant 25 communes sur le bassin, il est divisé en trois commissions avec des domaines de compétences spécifiques : la gestion des ressources en eau (BEP II, Actions renforcées, PMPOA,...) ; la gestion du patrimoine naturel et culturel (sites Natura 2000, ...) et le tourisme.

La qualité globale de l'eau sur le bassin versant du Scorff est relativement bonne (Syndicat du Scorff, 1994), avec cependant des disparités spatiales pour les différents types de polluant analysés :

- Concernant le phosphore, on note depuis 1992, une dégradation nette de la qualité des eaux par cet élément, principalement en période d'étiage (de mai/juin à septembre) où de faibles pollutions estivales (surtout de type industrielle, piscicole et domestique) ont des conséquences importantes sur les teneurs mesurées (Syndicat du Scorff, 1994). Les concentrations faibles en amont du bassin versant (classées « qualité bonne et moyenne ») peuvent ainsi s'avérer importantes selon les années à l'embouchure du Scorff (classées « qualité mauvaise »).
- La norme européenne fixée à 25 mg/l pour les teneurs en nitrate dans l'eau est généralement respectée puisque les valeurs moyennes sur le bassin oscillent entre 20 et 30 mg/l. On note malgré tout des disparités spatiales importantes, les teneurs pouvant varier de moins 15 mg/l jusqu'à plus de 45 mg/l selon les sous bassins versant considérés. Cependant, malgré ces moyennes assez peu élevées à l'échelle régionale, on assiste comme pour le phosphore, à une dégradation progressive des valeurs moyennes et maximales de 1 à 1,3 mg/l/an (David, 1999).
- Les teneurs en pesticide dans l'eau dépassent souvent les valeurs réglementaires (fixées à 0.1 µm /l par matière active pour la plupart des molécules et à 0.5 µm /l pour l'ensemble des matières actives¹) sur le Scorff, avec des pointes supérieures à 2 µm /l pour l'isoproturon par exemple (mesures effectuées à la prise d'eau de Kéreven par l'INRA). La période critique se

¹ Décret 89-3 du 3 janvier 1989

situe au printemps, en relation avec les traitements effectués sur les cultures de maïs et sur les cultures légumières industrielles.

4.1.2. Un bassin versant à vocation agricole

La taille importante du bassin versant du Scorff (482 km²) à l'échelle de la Bretagne le place parmi les plus grands bassins faisant l'objet d'un programme relatif à la qualité de l'eau (BEP). D'une longueur totale de 75 km du nord (source dans la commune de Mellionnec des Côtes d'Armor à 220 m d'altitude) au sud (embouchure à Lorient), le bassin versant du Scorff est en revanche relativement étroit (une dizaine km de large). Ses affluents sont ainsi caractérisés par une faible longueur, uniformément répartis sur ses deux rives, le plus long étant le ruisseau de l'étang de Pontcalleck avec 14 km. Sa disposition nord-sud entraîne un gradient littoral/intérieur, perceptible à l'aval du bassin, là où le climat océanique est le plus prononcé (précipitations moyennes annuelles oscillant autour de 900 mm et très faible amplitude thermique journalière et saisonnière). A l'amont du bassin versant, les précipitations sont plus importantes (1100 mm/an) et les températures plus fraîches l'hiver. Les précipitations régulières sur toute l'année assurent un débit moyen de 5 m³/s avec cependant des écarts saisonniers s'échelonnant entre 1,4 m/s au mois d'août et 10,3 m/s en février, caractéristiques d'un cours d'eau aux débits d'étiage relativement soutenus (David, 1999). Ces débits relativement importants s'expliquent entre autres par les précipitations importantes notamment en amont du bassin versant mais également par la nature peu perméable des roches. Deux entités géologiques peuvent être distinguées (Ferrand, 1993) séparées par une faille de cisaillement : au nord, se trouve le domaine centre armoricain représenté par des formations sédimentaires et par les granites de Pontivy et de Rostrenen ; au sud, l'anticlinal de Cornouailles avec du nord au sud, des migmatiques et des granites d'anatexie puis des micaschistes. Ces différentes caractéristiques physiques ont des répercussions sur le paysage et sur l'usage des terres du bassin versant, majoritairement orienté vers l'agriculture. Région bocagère jusque dans les années 1950, les remembrements effectués dans les années 1960-1970 sur la majorité des communes du Scorff, ont fortement contribué à modifier le paysage du bassin en privilégiant une agriculture de type intensif sur les plateaux (parcellaire à maille large et dégagée) et en conservant les boisements dans les parties encaissées du Scorff et de ses affluents. Les disparités spatiales restent cependant importantes sur le bassin. Ferrand (1993) y définit sept entités paysagères principales. Outre l'estuaire, l'habitat aggloméré et les bois couvrant 39% du bassin, il distingue deux types de bocage : le bocage à mailles larges et le bocage traditionnel (maillage continu de haies denses), qui en 1993 représentaient respectivement 21% et 11% de la surface totale. Il différencie également les champs ouverts avec bosquets composés de grandes parcelles avec des reliquats de trame bocagère (11%) et

les champs ouverts constitués d'un parcellaire large dépourvus de tout élément bocager (18%).

Le bassin versant est globalement peu industrialisé et sur la quinzaine d'établissements industriels recensés, la plupart relèvent du secteur agroalimentaire. Par ailleurs, les activités économiques de type tertiaire restent majoritairement concentrées sur l'agglomération de Lorient-Lanester. Le bassin versant du Scorff est ainsi avant tout orienté vers l'agriculture. La surface agricole utile sur le bassin versant du Scorff s'élève à environ 30 000 ha, soit environ 55% de la surface totale, une forte proportion des espaces non cultivés correspondant aux zones urbaines et aux surfaces boisées, importantes sur l'ensemble du bassin versant. La production agricole est basée essentiellement sur l'élevage bovin avec des variantes locales (Figure 50). Ainsi, la partie amont du bassin versant, comprend des exploitations de type bovin associées à de l'élevage hors-sol -essentiellement des volailles-, impliquant une forte concentration animale ayant entraîné le classement du canton de Guéméné-su-Scorff en ZES (Zone d'Excédent Structurel). Dans la partie centrale, le système bovin est moins intensif et se caractérise par une large prédominance des cultures fourragères. Sur la partie aval, les systèmes d'exploitation sont beaucoup plus variés, on retrouve des systèmes bovins classiques ou avec du hors-sol « porc », des cultures de vente (légumes), etc.

En plus de cette orientation principale basée sur l'élevage bovin, deux types d'activités agricoles spécifiques se sont développées sur le bassin versant:

- la pisciculture : trois établissements piscicoles sont implantés sur le bassin versant (David, 2004). L'élevage concerne surtout les salmonidés, poissons particulièrement exigeants d'un point de vue environnemental. On les trouve ainsi sur des affluents du Scorff où une bonne qualité de l'eau et un débit régulier autorisent ce genre d'activité (Pont-Calleck, commune d'Inguiniel ; Pont-Kerlo sur la commune de Plouay et Meslien sur la commune de Cléguer). Ces élevages piscicoles apparaissent paradoxalement comme un facteur potentiel sérieux de la dégradation des cours d'eau car ils induisent de nombreux rejets (matières organiques, azote ammoniacal, produits chimiques...) issus du nettoyage des bassins et de la prévention des nombreuses maladies qui peuvent affecter ces élevages.

- la production de cultures légumières industrielles : elles sont principalement localisées dans les parties sud (communes de Cleguer, Caudan, Lanester et Gestel) et nord-est du bassin versant (communes de Lignol et Persquen). Les cultures légumières les plus répandues sont les petits pois, les haricots, les carottes et les épinards. Implantées généralement au printemps, ces cultures ont des cycles de production très courts (de 45 à 70 jours après semis pour les épinards, 6 mois pour les carottes,...). Ce type de culture est également exigeant d'un point de vue agronomique. Elles requièrent des sols peu profonds riche en matière organique et ont des besoins en eau importants. Par ailleurs, pour une meilleure rentabilité économique, les

coopératives agricoles imposent une taille minimale des parcelles fixée à 3 ha sur des terrains plats avec une pente généralement inférieure à 10% (Moreno Peralto, 2001). Les cultures légumières industrielles sont de grandes consommatrices de fertilisants et de produits phytosanitaires et représentent les principales cultures irriguées sur le bassin versant².

Les pollutions d'origine agricole sur la qualité de l'eau restent, mis à part sur quelques secteurs intensifs, relativement faibles sur l'ensemble du bassin versant du Scorff dans le contexte régional. Les teneurs moyennes en nitrates et en phosphores dans l'eau sont en deçà des valeurs européennes ; seules les teneurs en pesticide dépassent les valeurs réglementaires surtout durant la période printanière (partie 4.1.1). Cependant, la tendance observée depuis quelques années étant une augmentation sensible de certains types de pollution (nitrates et phosphore), la commission du syndicat de bassin versant chargée des ressources en eau a mis en place plusieurs actions renforcées dont un suivi de l'évolution de la couverture hivernale des sols à partir d'images satellitaires.

² Ces prélèvements pour l'irrigation représentent environ 440 000 m³ d'eau/an sur le bassin versant du Scorff (Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 1999)

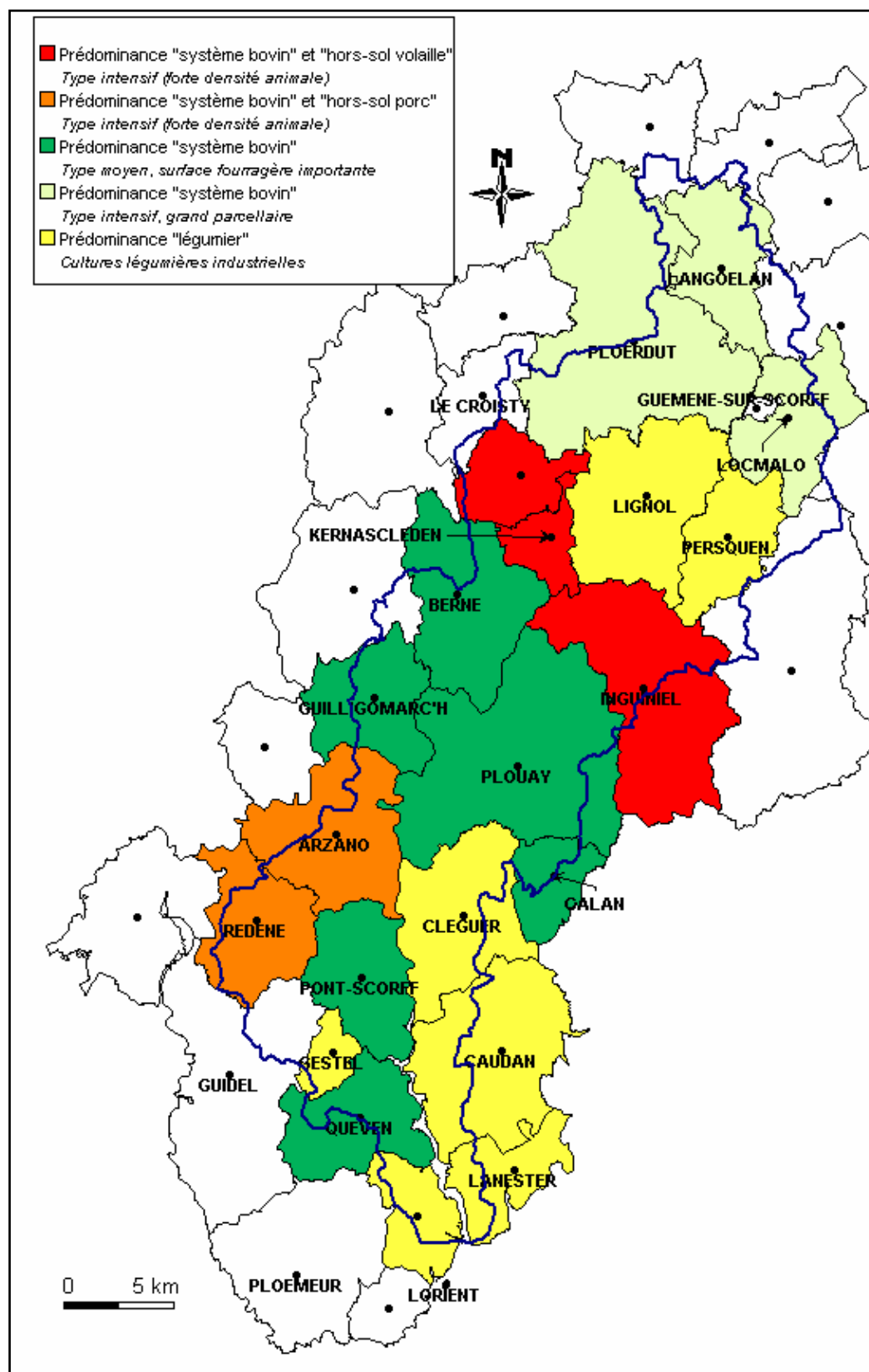


Figure 50- Typologie agricole sur le bassin versant du Scorff (source : Syndicat du Scorff, 1996)

4.1.3. Les données utilisées

La principale source d'informations disponibles est une série multitemporelle de 8 images satellitaires de haute résolution spatiale de type SPOT Xi, XS, IRS-1D et de très haute résolution spatiale pour le dernier hiver étudié avec la programmation d'une image SPOT 5 (Tableau 25). Dans un premier temps, seules les scènes satellitaires des hivers 2000/2001 et 2001/2002 et des étés 2001 et 2002 ont été utilisées pour déterminer l'historique des changements de couverture hivernale des sols sur le bassin versant. La scène de l'hiver 2002/2003 a, quant à elle, d'une part servi à valider l'identification des facteurs de changements de couvert hivernal des sols réalisée à partir de l'analyse de cet historique, et a d'autre part été intégrée dans le processus de modélisation visant à prédire la couverture hivernale pour l'hiver 2003-2004. La scène satellitaire de l'hiver 2003/2004 n'a été employée que pour valider la prédiction du couvert par les modèles.

Des données complémentaires de types vectorielles fournies par le Syndicat du Scorff ont également été utilisées, d'une part pour effectuer des classifications sur les images, d'autre part pour exploiter statistiquement les résultats sous un SIG. Elles comprennent diverses limites administratives, et les limites parcellaires définies à partir d'un orthophotoplan remises à jour à l'aide des données satellitaires. En dehors de quelques relevés terrain effectués ponctuellement afin de classer les images satellitaires, aucune autre donnée n'a été utilisée pour cette application.

A partir de ces données images et vectorielles, un suivi de l'évolution de l'occupation du sol est effectué depuis l'hiver 2000/2001 sur l'ensemble du bassin versant du Scorff et analysé plus précisément à l'échelle des sous bassins versants à l'initiative du Syndicat du Bassin versant du Scorff dans le cadre du programme d'action renforcée retenu au titre du programme régional Bretagne Eau Pure n°2. Il a donné lieu à un premier rapport réalisé par l'ENSAR mettant en évidence la répartition des modes d'occupation des sols, en particulier des cultures légumières pour l'année culturale 2001 (Moreno Peralto, 2001). Il s'est poursuivi depuis juillet 2002, dans le cadre de la 4^{ème} année du programme d'action renforcée, par une étude réalisée par l'équipe COSTEL UMR LETG 6554 du CNRS et le bureau d'étude SOGREAH (Syndicat du Scorff, 2004), dont l'objectif est d'effectuer un suivi de la couverture hivernale des sols par la végétation³.

³ La représentation cartographique à l'échelle parcellaire de l'ensemble du bassin versant n'étant pas lisible au format A4, les figures produites dans cette partie sont présentées à l'échelle des sous bassins versants.

Date de prise de vue		Capteur	Opérateur des Traitement	Objectifs
Hiver 2000/2001	08/01/2001	SPOT 4 Xi	ENSAR	Identification des cultures légumières
Printemps-Eté 2001	12/05/2001	SPOT 4 Xi	ENSAR	
Hiver 2001/02	16/12/2001	SPOT 4 Xi	COSTEL	Suivi et analyse de l'occupation des sols en été et en hiver
Printemps-Eté 2002	22/04/2002	SPOT 3 XS	COSTEL	
	13/08/2002	SPOT 4 Xi	COSTEL	
Hiver 2002-2003	25/11/2002	IRS-1D	SOGREAH	
Eté 2003	12/06/2003	SPOT 4 Xi	SOGREAH	
Hiver 2003-2004	24/01/2004	SPOT 5 Xi	COSTEL	

Tableau 25- Liste des images utilisées

4.2. Les changements de la couverture hivernale des sols

Le processus de détermination des changements de la couverture hivernale des sols et des facteurs qui les motivent, élaboré pour le bassin versant du Yar (Chapitre 2), est dans cette partie, transposé au bassin versant du Scorff. Le contexte de cette application est totalement différent : le terrain d'étude est nettement plus étendu (61,5 km² environ pour le Yar contre 482 km² pour le Scorff), plus diversifié du point de vue de l'occupation du sol (cf partie 4.1.2.), et les seules sources d'information utilisées sont des images satellites optiques de haute et très haute résolution. Pour cette application, aucune donnée agricole ou information issue d'une expertise n'a été employée à l'exception d'un calendrier agricoles et de contrôles terrain très limités, l'objectif de ce chapitre étant de se placer, à l'inverse de l'expérimentation effectuée sur le du bassin-versant expérimental du Yar, dans un contexte beaucoup plus classiquement rencontré, où la base de connaissances sur les dynamiques spatiales d'un territoire se limite à une analyse des changements d'occupation du sol par télédétection.

La connaissance de l'historique de la couverture hivernale des sols à partir des images de télédétection constituant la seule source d'information, seule son analyse est utilisée afin d'identifier les facteurs significatifs motivant les changements de la couverture des sols sur le bassin versant. Une fois déterminés, une analyse de ces facteurs, basée sur l'information mutuelle entre les variables, est alors effectuée afin de les valider et de les hiérarchiser.

4.2.1. Analyse des changements de l'occupation et de l'utilisation des sols par télédétection

Les changements ne sont déterminés que pour trois hivers, l'objectif poursuivi étant d'évaluer l'intérêt de la modélisation prédictive à partir d'une trajectoire de changements passés très courte. Ainsi, seules les observations dérivées des changements intervenus entre les hivers 2000/01 et 2001/02 servent dans un premier temps à identifier les facteurs de changements qui sont validés à partir de la scène acquise au cours de l'hiver 2002-2003. Les trois scènes sont ensuite utilisées pour simuler l'évolution de la couverture hivernale pour l'hiver 2003/2004 (sur le Yar, huit années de suivi ont été considérées). Rappelons que l'objectif principal visé est d'évaluer le processus de modélisation développé dans les chapitres précédents sur un espace où le contenu informationnel est nettement plus limité, afin de mesurer l'efficacité des modèles prédictifs utilisés dans le cas de données incomplètes et incertaines. Ainsi, seules des amorces de successions culturales et non de véritables rotations, qui nécessitent 6 à 7 ans de suivi au minimum, sont disponibles dans le cadre de cette application.

En conséquence, la couverture hivernale est d'abord décrite partir des scènes satellitaires acquises au cours de deux hivers et des étés correspondants, puis les cultures annuelles sont déterminées afin d'une part de quantifier et localiser les intercultures et leur évolution d'un hiver à l'autre et d'autre part d'identifier des débuts de rotations culturales permettant d'identifier une partie des facteurs qui ont causé les changements observés.

4.2.1.1. La détection de la couverture hivernale des sols

Les traitements appliqués sur les images des hivers 2000/2001 et 2001/2002 sont illustrés par la figure 51. Les classifications sont réalisées à partir du seuillage d'un indice de végétation, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Cet indice permet de mettre en évidence la végétation et de déterminer différents taux de couverture végétale sur les parcelles agricoles, la valeur de l'indice étant corrélée avec la présence et la densité de la végétation chlorophyllienne. Son seuillage en 2 classes, « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts », est guidé et validé par les contrôles terrain, les signatures spectrales dérivées des images du printemps et de l'été et des calendriers agricoles. La précision de la classification,

évaluée à travers le calcul d'un indice de Kappa, atteint, pour l'hiver 2001-2002, 97%. Ce très bon score de classification justifie l'emploi du NDVI sur ces images.

L'image résultat est alors intégrée dans le SIG contenant la base de données vectorielles. Elle est ensuite intersectée avec les limites de bassin versant et la carte des classes d'occupation des sols dérivée de l'orthophotoplan de 1999, de façon à masquer la partie non SAU du bassin versant. Son croisement avec la couche parcellaire permet d'affecter une valeur de classe unique à chaque parcelle-polygone, la valeur de la classe majoritaire. La mise en correspondance de cette couche « Cartographie de la couverture hivernale des sols » avec les couches de la base de données permet d'effectuer des requêtes et de produire des résultats sous forme cartographique et statistique.

La surface occupée par les sols nus à peu couverts pour l'hiver 2001-2002 représente ainsi 6002 ha, soit 20,7% (SAU) du bassin versant du Scorff (Tableau 26).

<i>Occupation du sol</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>% de la Surface Totale du bassin versant</i>
Surfaces boisées	13844	28,8
Bâti	4957	10,3
Eau	393	0,8
Sols nus	6002	12
Sols couverts	22862	48

Tableau 26- Occupation du sol sur le bassin versant du Scorff (décembre 2001)

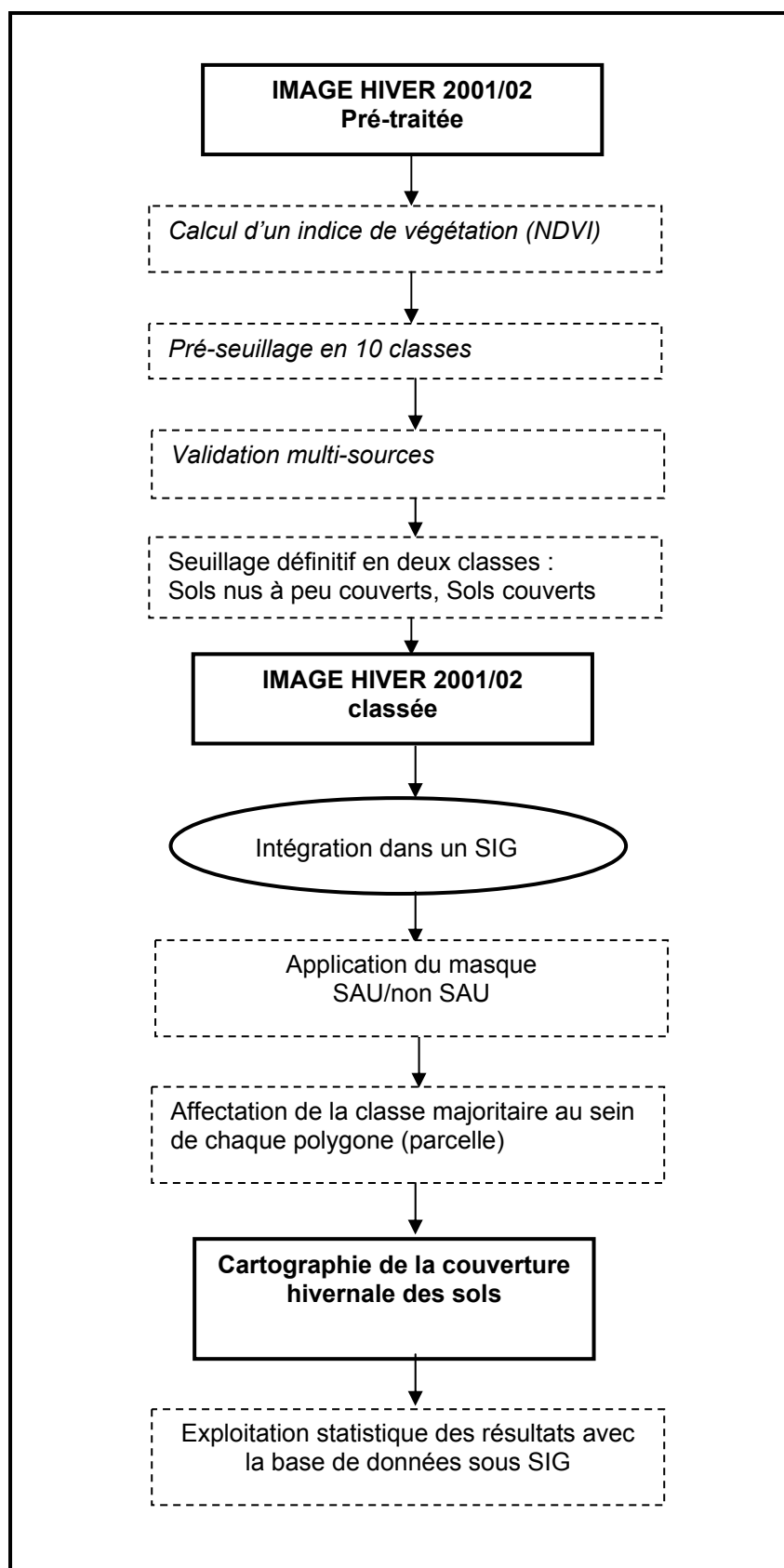


Figure 51 – Traitements effectués sur les images hivernales, exemple de l'hiver 2001/2002 (Bassin versant du Scorff)

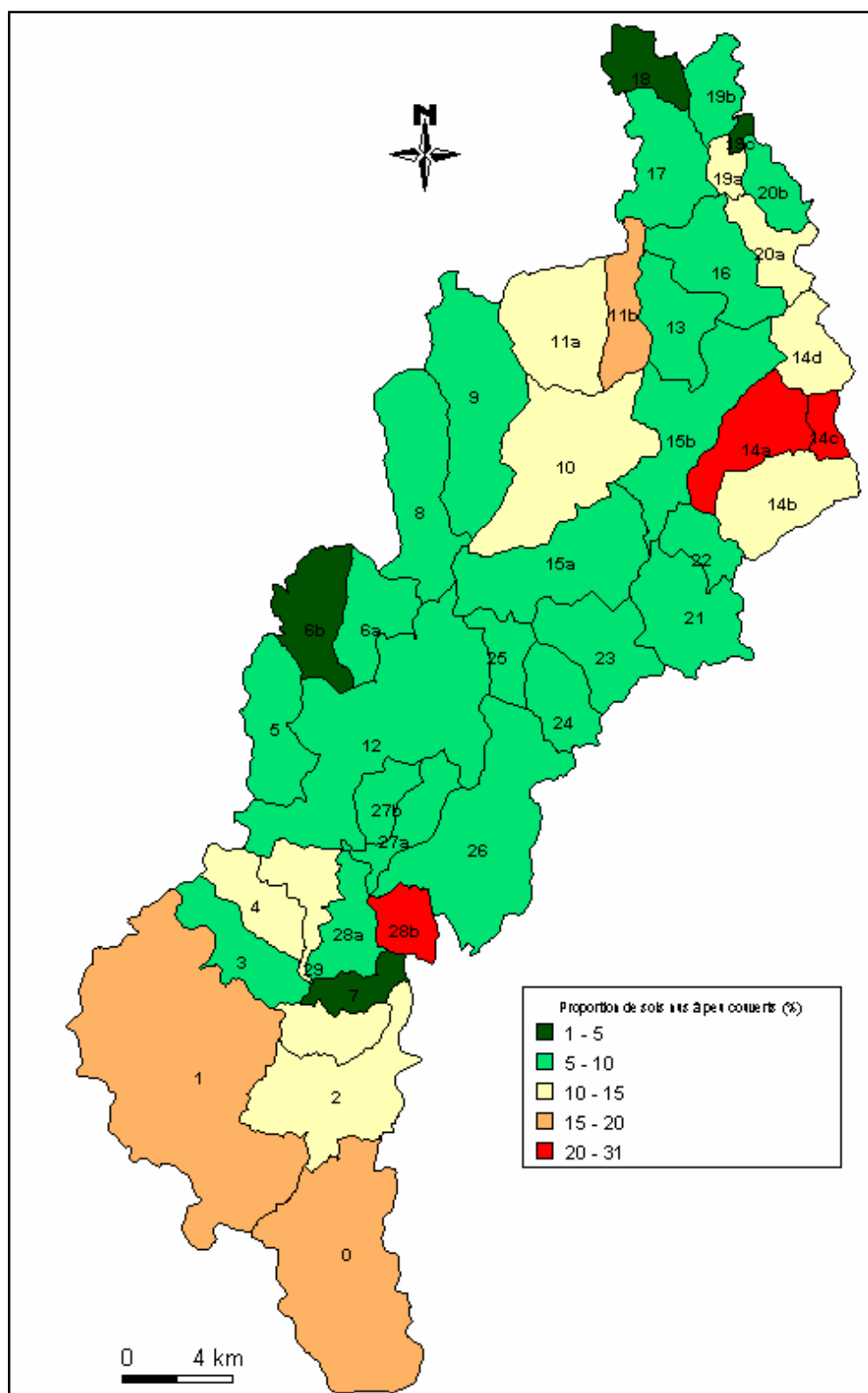


Figure 52 - Pourcentages de sols nus à peu couverts par sous-bassin versant par rapport à la SAU (Scorff, décembre 2001)

A l'échelle des sous-bassins versants, des disparités se dégagent (Figure 52). Si l'on considère la situation en décembre 2001, les pourcentages de sol nus à peu couverts par rapport à la SAU varient de 3% à 31 %. La partie aval du bassin versant est caractérisée par des taux de sols nus à peu couverts plus importants car on y retrouve des cultures légumières et des surfaces importantes en céréales d'hiver (qui ressortent au mois de décembre en sols nus à peu couverts). Sur la partie amont du bassin versant, seul un sous-bassin versant est caractérisé par un taux important en sols nus (26% de la SAU), dû également à la présence de cultures céréalières qui, en hiver, couvrent très faiblement les sols.

4.2.1.2. La détection des cultures annuelles

Les traitements appliqués sur les images d'été sont illustrés par la figure 53. Chaque image est classée de façon supervisée avec les échantillons terrain, la méthode de classification choisie étant le maximum de vraisemblance. La précision de la classification est évaluée à partir du calcul d'un indice de Kappa qui s'élève au minimum à 89%. Les images classées sont alors post-traitées (affectation d'un filtrage médian 3*3) pour uniformiser les données.

Le croisement de la cartographie provisoire issue du traitement de l'image d'été avec la cartographie de la couverture hivernale des sols permet d'obtenir la couche « cartographie définitive des cultures annuelles ». Le croisement des couches « Cartographie de la couverture hivernale des sols » avec les couches « cartographie définitive des cultures annuelles » des années 2001 et 2002 produit des cartes de successions des modes d'occupation des sols qui permettent de discriminer les sols nus à peu couverts « véritables » et les sols peu couverts par des jeunes cultures, et d'identifier les cultures précédant et succédant aux sols nus ou aux sols couverts. L'analyse des intercultures peut alors en être déduite.

Les sols nus « véritables » totalisent pour l'hiver 2001/2002, 1615 ha soit 5,5% de la SAU du bassin versant. Cette faible valeur s'explique par le fait que les céréales pour la saison 2001/02 couvrent une surface importante 5134 ha, soit 17,7 % de la SAU, surface en céréales d'ailleurs plus importante que l'année précédente (4476 ha, soit 15,5 % de la SAU en 2001). A l'échelle des sous bassins versants, les taux de sols nus à peu couverts s'échelonnent de 1% à 12%. Les sous-bassins versants concernés par les plus forts taux de sols nus « véritables » sont ainsi localisés sur la partie centre-est et amont du bassin versant où le maïs représente une part importante (SAU).

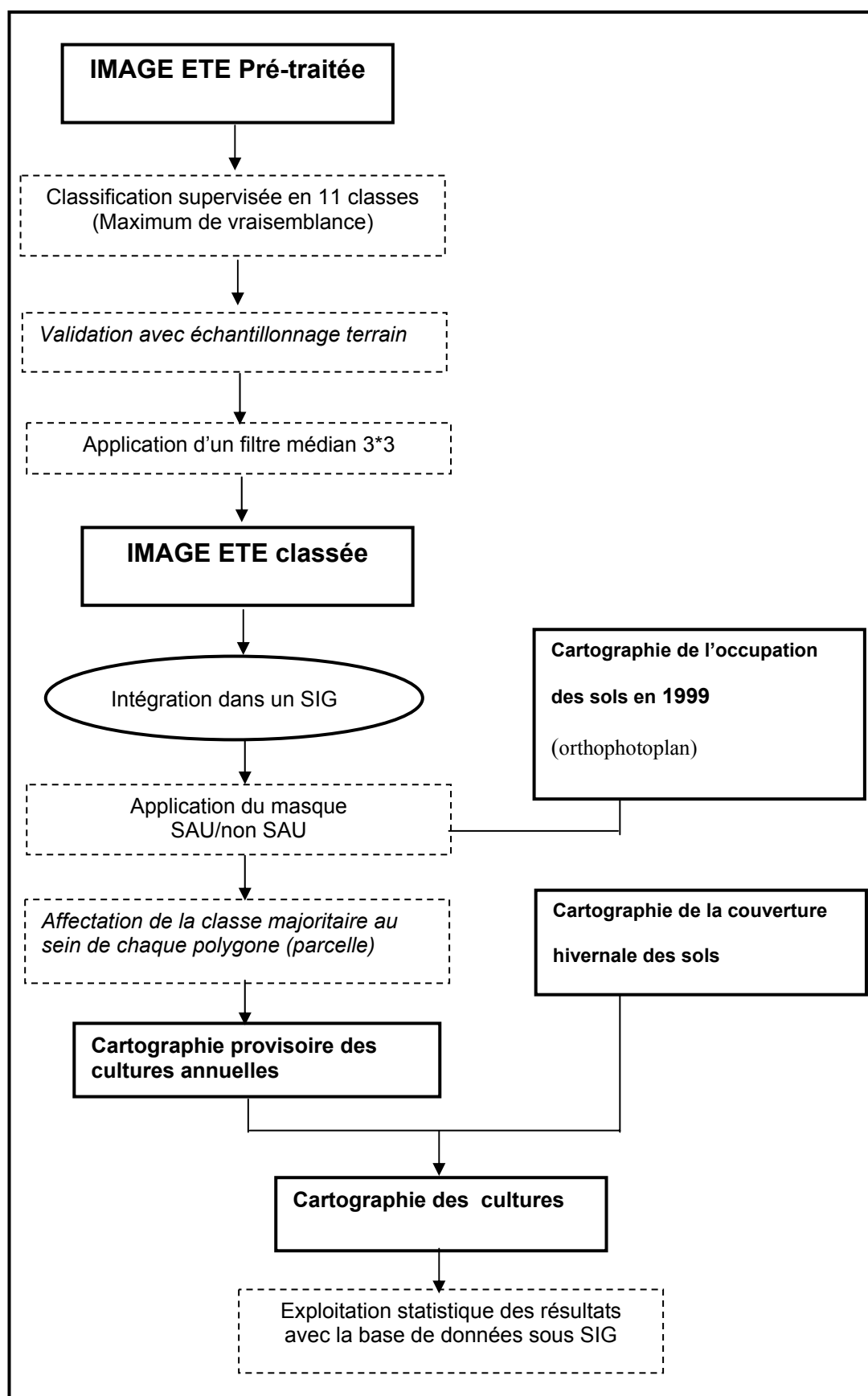


Figure 53- Etapes de Traitement des images d'été (Bassin versant du Scorff)

Le bassin versant du Scorff est caractérisé par une part plutôt faible des cultures puisqu'elles ne représentent que 60% de la surface totale (Tableau 27). Ceci s'explique par le fait que les surfaces boisées couvrent une surface importante du bassin versant (près de 13 865 ha), surtout dans sa partie centrale. Hiérarchiquement, et à l'instar des précédentes études réalisées sur le Scorff, les prairies couvrent la surface la plus grande avec 15 741 ha par exemple pour l'année 2002, soit 32,6% de la SAU, suivies par les cultures de maïs (7 293 ha soit 15,2% de la SAU) et les céréales (5 134 ha soit 10,7% de la SAU), les cultures légumières restant largement minoritaires (642 ha, soit 2% de la SAU). Ces dernières sont représentées surtout dans le nord et le sud du bassin versant.

<i>Occupation du sol</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>% de la Surface Totale du bassin versant</i>	<i>% de la SAU</i>
Surfaces boisées	13864	28,8	
Bâti	4957	10,3	
Eau	393	0,8	
Prairies	15741	32,6	54,53
Céréales	5134	10,7	17,78
Maïs	7293	15,2	25,26
Haricots	251	0,5	0,86
Pois	104	0,2	0,36
Carottes	123	0.25	0,42
Autres cultures	164	0.33	0,56
Indéterminé (nuages...)	54	0.1	0,18

Tableau 27- Occupation du sol sur le bassin versant du Scorff en été 2002

4.2.1.3. Le suivi de la couverture hivernale des sols pour les hivers 2000/01-2001/02

Si l'on compare les surfaces en sols nus à peu couverts déterminées exclusivement à partir des scènes satellitaires d'hiver, on observe une augmentation des sols nus à peu couverts de 5182 ha en 2000/01 à 6002 ha en 2001/02, soit une progression de 2,84% (Tableau 28). Cette augmentation s'explique en partie par les dates d'acquisition des images. La scène de 2001/02 date du 16 décembre 2001 et celle de 2000/01 du 8 janvier, et la végétation est à un stade plus avancé pour cette dernière. Mais si l'on croise ces deux scènes avec les images d'été qui les suivent, l'explication dominante devient alors l'augmentation importante des céréales en 2002. Ainsi, les parcelles en sols nus à peu couverts pendant l'hiver 2001/02, date à laquelle les céréales d'hiver recouvrent très faiblement les sols, sont plus nombreuses. En conséquence, on observe que les sols nus à peu couverts « véritables » sont en réalité moins importants en 2001/02 qu'en 2000/01 : 1615 ha soit 5,5% de la SAU contre 2456 ha, soit 8,5% de la SAU.

On note ainsi une hausse sensible des sols couverts précédant les maïs : au cours de l'été 2001, 59% des cultures de maïs étaient précédées d'un sol couvert (12,29% de la SAU), contre près de 78% l'année suivante (19,67% de la SAU).

HIVER ETE SUIVANT	Hiver 2000/2001		Hiver 2000/2001		Hiver 2001/2002		Hiver 2001/2002		Evolution des sols nus à peu couverts %
	SOLS NUS A PEU COUVERTS		SOLS COUVERTS		SOLS NUS A PEU COUVERTS		SOLS COUVERTS		
	ha	% SAU	ha	% SAU	ha	% SAU	ha	% SAU	
Prairies	2325	8,05	14960	51,28	1335	4,62	14406	49,9	-3.43
Céréales	24	0,08	4451	15,41	2828	9,79	2306	7,98	+9,71
Maïs	2456	8,5	3548	12,29	1615	5,59	5678	19,67	-2,90
Autres cultures	377	1,3	436	1,51	202	0,69	440	1,52	-0,61
TOTAL	5182	17,95	23395	81	6002	20,79	22862	79,2	+2,84

Tableau 28-Evolution de la couverture hivernale des sols pour les hivers 2000/01 et 2001/02

A l'échelle des sous bassins versants (Figure 54), l'évolution des sols nus à peu couverts entre les hivers 2001/02 et 2000/01 montre une hausse globale des sols nus à peu couverts localisés essentiellement sur la partie amont du bassin versant. On note cependant une baisse sensible des sols nus à peu couverts (baisse comprise entre 2 et 12%) sur les bassins versants de L'estuaire au sud et de la rivière Le Scave situés au sud-ouest du bassin versant, pourtant caractérisés par une exploitation intensive de l'occupation du sol avec notamment une part importante d'activité hors-sol sur la partie ouest du Scave. La partie

centrale du bassin versant ne connaît pas de changements importants, avec des taux de variations compris entre -2 et 2%.

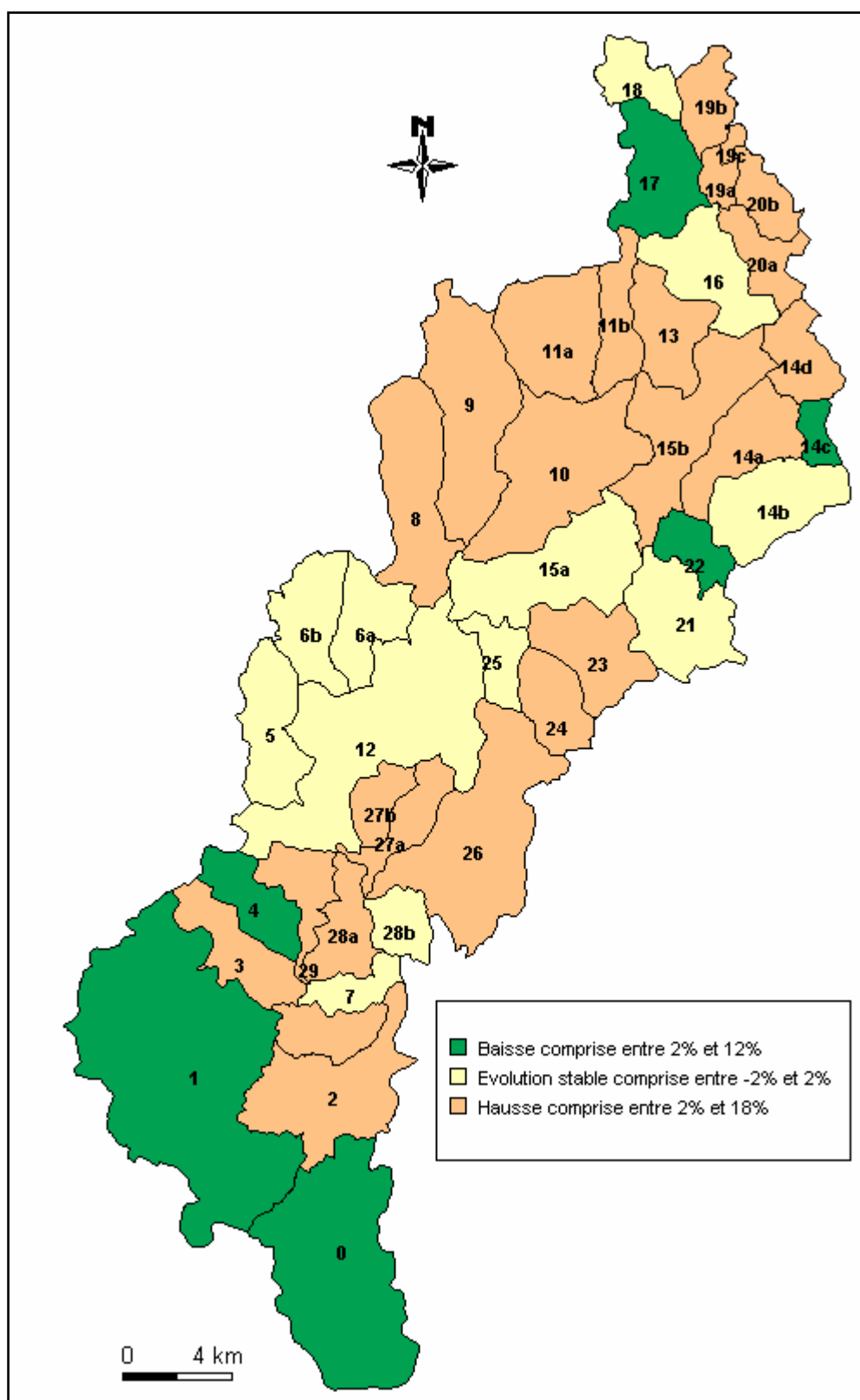


Figure 54- Evolution des sols nus à peu couverts par sous bassins versants entre les hivers 2001/02 et 2000/01

4.2.1.4. Le suivi des cultures annuelles pour les étés 2001 et 2002

L'analyse diachronique des deux étés met en exergue une baisse des prairies au profit des céréales et du maïs pour l'été 2002 (Tableau 29). Ainsi, les prairies représentaient 17286 ha (59,88% de la SAU) en 2001 contre 15741 ha en 2002 (soit 54,53% de la SAU). Au niveau des cultures légumières, on note pour l'été 2002 une augmentation des cultures de haricots et de carottes et une baisse sensible des pois.

Occupation du sol	Été 2002		Été 2001		Evolution
	(ha)		(ha)		(%)
Surfaces boisées	13864 ha		13864 ha		stable
Bâti	4957 ha		4957 ha		stable
Eau	393 ha		393 ha		stable
Cultures	(ha)	(% SAU)	(ha)	(% SAU)	
Prairies	15741	54,53	17286	59,88	-5,35
Céréales	5134	17,78	4476	15,50	+2,28
Maïs	7293	25,26	6005	20,80	+4,46
Haricots	251	0,86	143	0,49	+0,37
Pois	104	0,36	447	1,54	-1,18
Carottes	123	0,42	65	0,22	+0,20
Autres cultures	164	0,56	158	0,54	+0,02
Indéterminé	54	0,18	284	0,98	-0,80

Tableau 29- Evolution de l'occupation du sol entre les étés 2001 et 2002

L'évolution de l'occupation du sol à l'échelle des sous-bassins versants confirme que certains d'entre eux sont plutôt orientés vers des types de culture spécifiques comme par exemple les cultures légumières intensives. Les évolutions entre sous-bassins versants sont donc faibles, puisque l'on retrouve hiérarchiquement les prairies, les cultures de maïs puis de céréales pour les deux dates, les changements observés étant liés aux rotations culturales.

4.2.1.5. Les successions des modes d'occupation des sols

Le croisement des cartes d'occupation du sol de l'été 2001 et de l'hiver 2001-2002 permet de connaître les précédents culturaux pour ce dernier. Sur les 6002 ha occupés par la classe « Sols nus à peu couverts » en décembre 2001, 3479 ha soit 58% sont précédés d'une culture de maïs (Tableau 30).

Été 2001	Hiver 2001-2002	Surface (ha)	% SAU
Céréales	<i>Sols nus à peu couverts</i>	663	2,29
	Sols couverts	3813	13,21
Maïs	<i>Sols nus à peu couverts</i>	3479	12,05
	Sols couverts	2526	8,75
Prairies	<i>Sols nus à peu couverts</i>	1466	5,07
	Sols couverts	15820	54,80

Tableau 30- Précédents culturaux pour l'hiver 2001/02

L'intersection des trois dates définit des débuts de rotations culturales sur le bassin versant du Scorff. Le tableau 31 montre ainsi quelques successions types : On estime ainsi que les parcelles concernées deux années de suite par des cultures de maïs et détectées en hiver en sols nus à peu couverts totalisent 1006 ha soit 3,48% de la SAU. Les parcelles en céréales suivies d'un maïs l'été suivant sont majoritairement couvertes, puisque seulement 240 ha (0,83% de la SAU) sont détectés en sols nus contre 1728 ha en sols couverts (5,98% de la SAU).

Été 2001	Hiver 2001-2002	Été 2002	Surface (ha)	% SAU
Maïs	<i>Sols nus à peu couverts</i>	Maïs	1006	3,48
	Sols couverts		527	1,82
Prairies	<i>Sols nus à peu couverts</i>	Prairies	623	2,15
	Sols couverts		11723	40,61
Céréales	<i>Sols nus à peu couverts</i>	Maïs	240	0,83
	Sols couverts		1728	5,98
Maïs	<i>Sols nus à peu couverts</i>	Céréales	506	1,75
	Sols couverts		771	2,67
Prairies	<i>Sols nus à peu couverts</i>	Maïs	322	1,11
	Sols couverts		3206	11,10

Tableau 31- Exemples de successions culturales sur le Scorff (été2001/hiver 2001-2002/été2002)

4.2.2. Les facteurs de changements

En l'absence de connaissances « expert » permettant d'identifier *a priori* et de hiérarchiser qualitativement les facteurs de changements de la couverture hivernale sur le bassin versant, c'est l'analyse statistique des changements d'occupation du sol sur le bassin versant du Scorff réalisée entre les hivers 2000-2001 et 2001-2002 à partir des données de télédétection qui est utilisée. Les facteurs identifiés sont validés *a posteriori* avec la carte de la couverture hivernale des sols de l'hiver 2002-2003 dérivée d'une scène satellitaire acquise au cours de cette saison, afin d'évaluer les relations existant entre les facteurs de changements identifiés et l'état du couvert de l'hiver suivant.

4.2.2.1. Choix et validation des facteurs de changement

Dans la mesure où les systèmes de production sont, pour partie, similaires à ceux qui caractérisent le bassin versant du Yar, la liste de facteurs déterminés sur ce dernier a servi de point de départ à l'identification des facteurs de changement intervenus sur le bassin versant du Scorff. Ainsi, les facteurs relatifs à la taille des parcelles et aux occurrences de sols nus à peu couverts sur la période étudiée, accessibles à partir des données disponibles, ont été retenus. Etant donnée la taille du bassin versant et en l'absence de données relatives aux exploitations agricoles (emplacement du siège, orientation technico-économique, mesures agro-environnementales appliquées par les exploitants agricoles...), l'analyse statistique sous SIG de l'évolution de l'occupation des sols à l'échelle des sous bassins-versants a permis de dégager des variables relatives d'une part à l'orientation des systèmes de production (précédents culturels), et d'autre part aux mesures agro-environnementales (évolution des sols nus à peu couverts). Ce choix est soutenu par l'hypothèse suivante : l'orientation agricole et les mesures agro-environnementales sont homogènes à l'échelle des sous-bassins versants. Cette hypothèse, si elle paraît simplificatrice ne s'avère pas aberrante pour autant : les mesures agro-environnementales sont planifiées à l'échelle, non pas des exploitations agricoles, mais à celle des sous-bassins par le Syndicat de bassin versant du Scorff ; les systèmes de production agricoles sont, quant à eux, globalement répartis par grands ensembles sur le bassin versant (légumes industriels au sud et centre du bassin versant, système laitier intensif au nord, systèmes laitier et hors-sol au sud-ouest). En conséquence, seule une minorité de bassins versants comprennent deux ou plusieurs systèmes d'exploitation, la plupart d'entre eux ayant une dominante bien marquée.

Notons que les facteurs « Occurrence des sols nus à peu couverts » et « Evolution des sols nus » n'ont pas la même signification : le premier décrit une action individuelle à l'échelle de la parcelle, celle de l'exploitant agricole qui décide d'appliquer ou non une contrainte agro-environnementale ou de prendre l'initiative d'implanter une interculture en

l'absence de contrainte. Le second reflète à l'échelle des sous-bassins versants la politique agro-environnementale définie par le Syndicat de bassin-versant. Il correspond à une variable contextuelle dans laquelle s'inscrit l'action individuelle de l'agriculteur décrite dans le premier.

Ainsi, quatre facteurs ont été retenus : deux sont décrits à l'échelle de la parcelle agricole (La taille des parcelles ; les occurrences de sols nus à peu couverts observées au cours des deux hivers précédents), et deux le sont à l'échelle du bassin versant et ré-affecté à l'échelle de la parcelle (les précédents culturaux et l'évolution des proportions de sols nus à peu couverts). En conséquence, les approximations générées pour les derniers facteurs rendent les données décrivant ces facteurs à la fois imprécises et incertaines, puisqu'elles sont analysées à l'échelle parcellaire. Ce caractère à la fois imprécis et incertain des données sera pris en compte dans le processus de modélisation au niveau de l'affectation des jeux de masse.

- Les occurrences de sols nus à peu couverts à l'échelle parcellaire :

L'analyse de la variable « occurrences des sols nus à peu couverts à l'échelle parcellaire » entre les deux hivers analysés permet de définir trois classes : les parcelles toujours couvertes, les parcelles en sols nus à peu couverts durant un hiver et les parcelles en sols nus à peu couverts durant les deux hivers. Leur intersection avec la carte de l'hiver 2002-2003 (Figure 55) montre qu'une grande majorité (89.4%) des parcelles couvertes par la végétation entre les deux hivers le restent au cours de l'hiver 2002-2003. On remarque également que la proportion des sols nus à peu couverts en 2002-2003 augmente en fonction de l'occurrence de sols nus à peu couverts : elle atteint presque 30% lorsque les sols ont été nus au cours des deux hivers précédents, tandis qu'elle est limitée à 17,1% dans le cas où la parcelle a été couverte au moins un des deux hivers et 10% quand elle est restée couverte au cours des deux hivers.

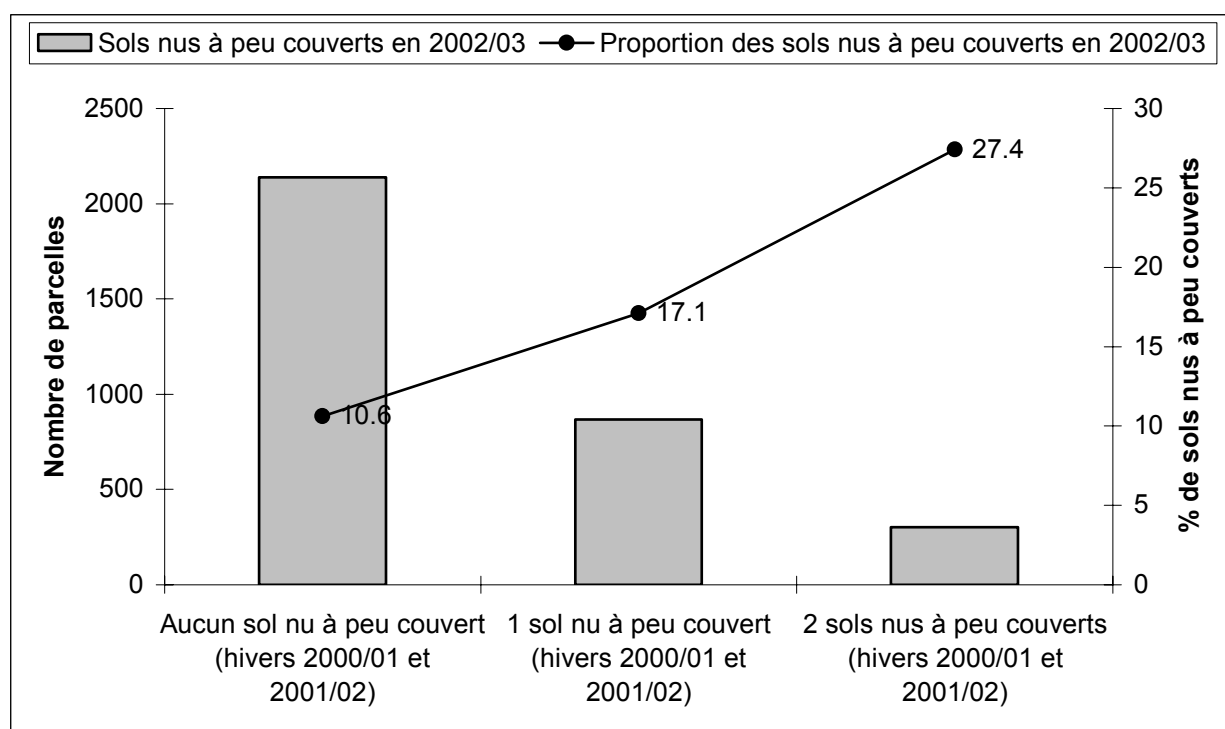


Figure 55- Relation entre l'occurrence des sols nus à peu couverts au cours des hivers 2000-2001 et 2001-2002 et la proportion de sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003

- L'évolution des sols nus à peu couverts à l'échelle des sous bassins versants

La figure 56 montre que la l'évolution des surfaces en sols nus à peu couverts constatée entre les hivers 2000-2001 et 2001-2002 est corrélée avec le taux de couverture de l'hiver 2002-2003. Ainsi, la diminution des sols nus est d'autant plus élevée en 2002-2003 que la baisse constatée entre les deux hivers précédents est importante, prolongeant et étendant ainsi les actions agri-environnementales amorcées sur les bassins versants. Ainsi, les sols nus à peu couverts ne représentent que 12% du couvert au cours de l'hiver 2002-2003.

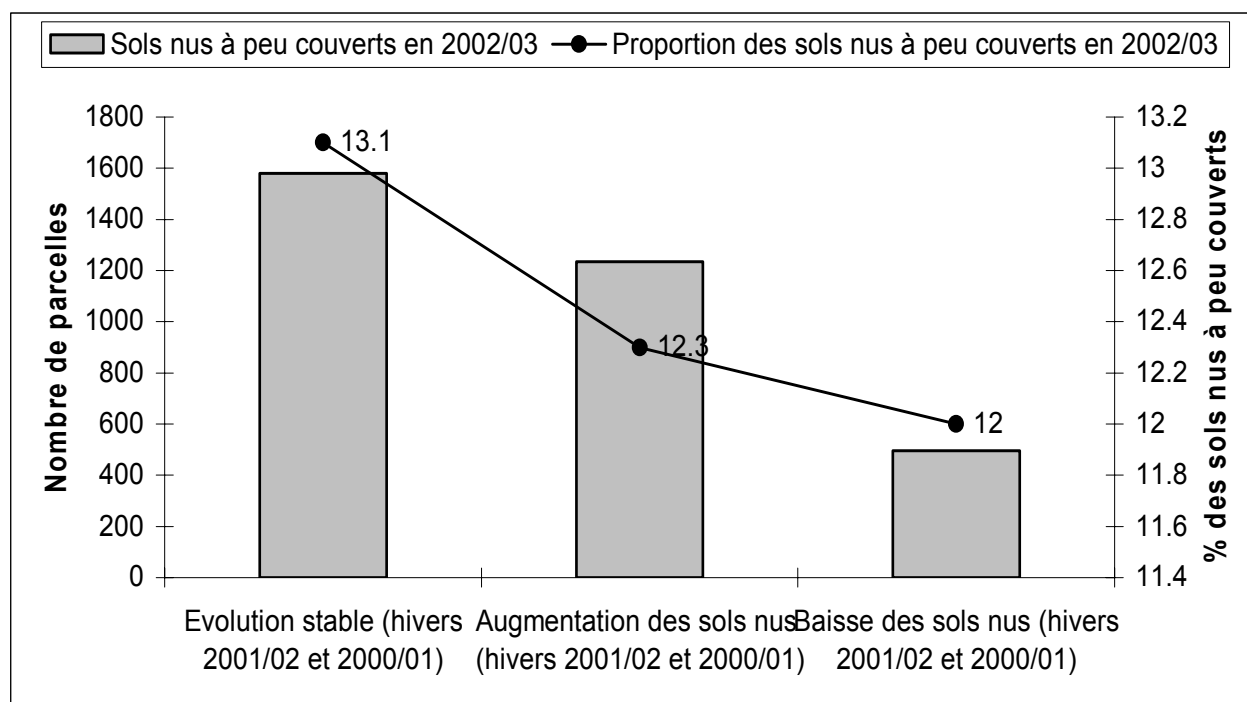


Figure 56- Relation entre l'évolution des sols nus à peu couverts au cours des hivers 2000-200 et 2001-2002 par sous bassins versants » et la proportion de sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003

- La taille du parcellaire

La variable « Taille du parcellaire » est divisée en 4 classes correspondant à la diversité du parcellaire sur le bassin versant du Scorff. La variable « Taille du parcellaire » semble corrélée à la variable « Proportion des sols nus à peu couverts » observée au cours de l'hiver 2002-2003, sauf pour une classe (Figure 57). Ainsi, la proportion de sols nus à peu couverts observée augmente avec la taille des parcelles pour toutes les parcelles qui ont une taille supérieure à 0,5 ha. Près de 12% des parcelles inférieures à 0,5 ha, les plus nombreuses sur le Scorff, étaient en sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003. Par ailleurs, les parcelles supérieures à 2 ha se dégagent sensiblement des autres classes avec 15,7% de sols nus à peu couverts.

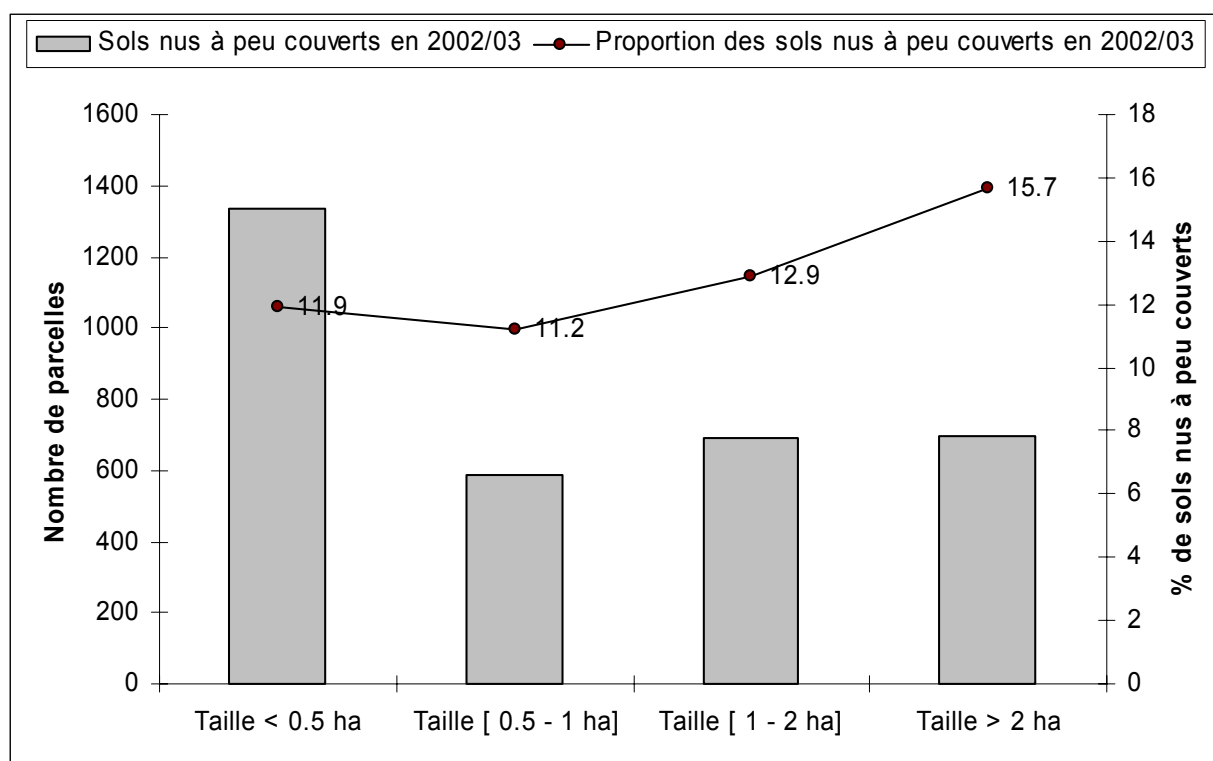


Figure 57- Relation entre la taille du parcellaire et la proportion de sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003

- Les précédents cultureaux

L'identification des précédents cultureaux de l'hiver 2002-2003 s'est limitée à définir trois types de culture : les prairies, les céréales hors maïs et les maïs. Les deux variables « Précédent cultureaux » et « Proportion des sols à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003 » sont corrélées, montrant ainsi une certaine stabilité à l'échelle des bassins versants (Figure 58). Les prairies suivies d'un sol couvert l'hiver suivant sont naturellement les plus nombreuses, même si l'on remarque que pas moins de 1800 parcelles en prairies sont détectées en sols nus à peu couverts pour l'hiver 2002-2003. Les céréales et le maïs, beaucoup moins présents sur le bassin, correspondent aux proportions les plus fortes de sols nus à peu couverts avec respectivement 22,3% et 21,2% des surfaces considérées.

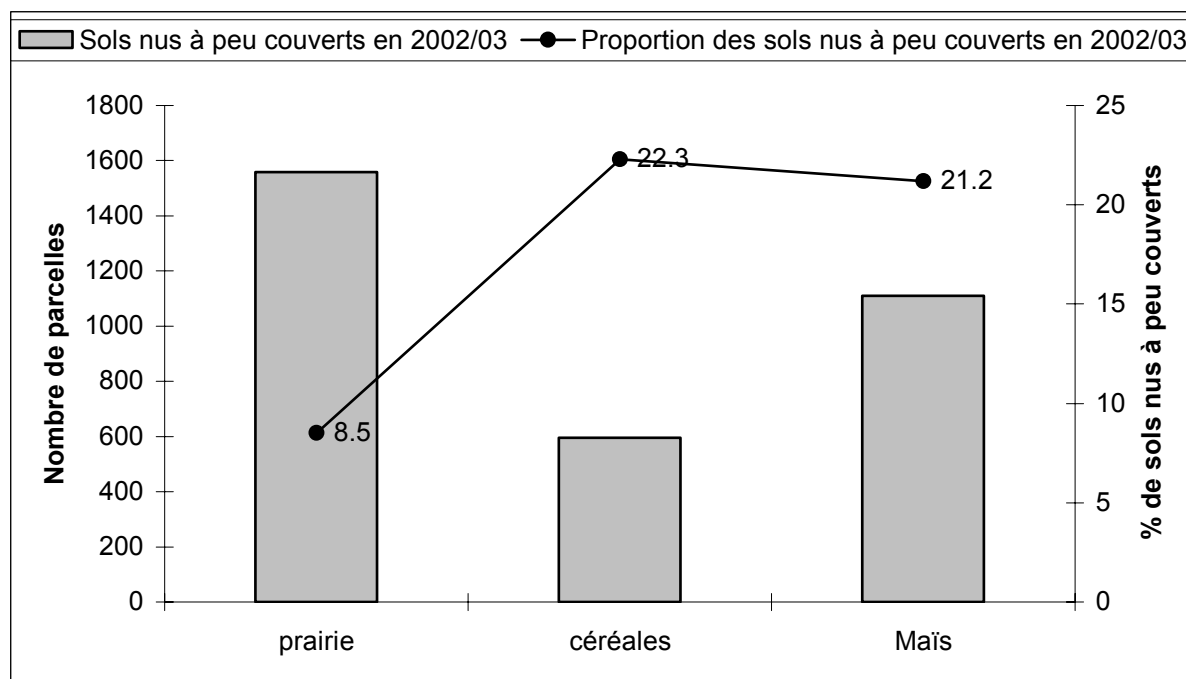


Figure 58- Relation entre le précédent cultural observé au cours des hivers 2000-2001 et 2001-2002 et la proportion de sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003

Des relations plus ou moins fortes entre les facteurs de changements de la couverture hivernale des sols détectés (hivers 2000/01 et 2001/02) et l'état du couvert pour l'hiver 2002/03 sont ainsi établies pour les classes « sols nus à peu couverts » et « sols couverts ». On note déjà que la relation entre les « occurrences de sols nus à peu couverts » et l'état de la couverture des sols en 2002/03 apparaît plus nette que celle qui la relie à la variable « Taille des parcelles ». Cette impression qualitative peut être vérifiée en mesurant le poids informatif de chaque variable explicative avec la variable à expliquer.

4.2.2.2. Hiérarchisation des facteurs de changement

La hiérarchisation des facteurs de changement est, comme pour le bassin versant du Yar, réalisée à partir du test d'information mutuelle entre les variables (chapitre 2). La variable « Précédents culturaux » apparaît ainsi comme étant la plus informative, suivie des variables « Occurrence de sols nus à peu couverts », « Taille des parcelles » et « Evolution des sols nus à peu couverts » (Tableau 32). Cette dernière variable apparaît peu informative dans l'analyse de la couverture hivernale des sols, sa prise en compte dans le processus de modélisation devra tenir ainsi compte de cette imprécision.

Facteurs	Entropie de la variable	Information mutuelle avec les autres variables	Hiérarchisation
Occurrence des sols nus à peu couverts	0,656	0,0063	2
Taille du parcellaire	1,310	0,0010	3
Evolution des sols nus à peu couverts	1,028	0,0003	4
Précédents culturaux avant l'hiver 2002/2003	0,831	0,0162	1

Tableau 32- Hiérarchisation des facteurs de changement à partir du test d'informations mutuelles entre les variables

4.3. Prédiction de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Scorff

Le mode d'affectation des jeux de masse diffère, de la méthode utilisée sur le bassin versant du Yar, puisque, aucune donnée experte n'est utilisée dans le cadre de cette application. Cette étape du processus de modélisation prédictive est donc d'abord détaillée, avant l'analyse comparative des résultats de simulation prédictive obtenus à partir des deux règles de fusion utilisées, c'est-à-dire la DST et la DSMT. Les autres étapes du processus de modélisation, identiques à celles qui ont été appliquées dans le cadre de l'expérimentation menée sur le bassin du Yar ne sont pas détaillées ci-après. .

4.3.1. La détermination des jeux de masse

Pour cette application, nous nous sommes placés dans un contexte où l'on ne dispose pas de connaissance experte. L'affectation des jeux de masses sur chaque évidence ou variable est ainsi réalisée à partir d'une analyse multicritères. La méthode de Saaty (1977) utilisée pour les analyses basées sur de nombreux critères est ici appliquée, car elle permet d'ordonner des critères en fonction de leur importance relative (Tableau 33), connue dans le cadre de cette application grâce au test basé sur l'information mutuelle préalablement effectué.

Chapitre 4. Simulations prédictives de l'occupation hivernale des sols au-delà du site expérimental

Moins important				Idem	Plus important			
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrêmement	Beaucoup	Modérément	Légèrement	Idem	Légèrement	Modérément	Beaucoup	Extrêmement

Tableau 33- Ordonnancement des critères en fonction de leur importance relative (Source : Saaty, 1977)

Appliquée aux facteurs de changements identifiés sur le bassin versant du Scorff, sur les deux hypothèses (sols nus à peu couverts et sols couverts), elle permet d'ordonner les variables par hypothèse (Tableaux 34 et 35) :

	C1	C2	C3	SN1	SN2	SN3	SN4	BV1	BV2	BV3	T1	T2	T3	T4
C1	1	5	5	1	3	5	9	3	3	3	1	3	3	5
C2	1/5	1	1	1/5	1	3	5	3	3	3	1/7	1	1	1
C3	1/5	1	1	1/5	1	3	5	3	3	3	1/7	1	1	1
SN1	1	5	5	1	3	5	9	7	5	3	1	1	3	3
SN2	1/3	1	1	1/3	1	3	3	3	3	3	1/3	1	3	3
SN3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1	3	1	1	1	1/7	5	3	1
SN4	1/9	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1	1	1/9	1/7	1/5	1/3
BV1	1/3	1/3	1/3	1/7	1/3	1	3	1	3	5	1/7	1/5	1/3	1/3
BV2	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3	1	1	1/3	1	3	1/7	1/5	1/3	1/3
BV3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	1/5	1/3	1	1/9	1/7	1/5	1/5
T1	1	7	7	1	3	7	9	7	7	9	1	3	5	7
T2	1/3	1	1	1	1	1/5	7	5	5	7	1/3	1	3	1/5
T3	1/3	1	1	1/3	1/3	1/3	5	3	3	5	1/5	1/3	1	3
T4	1/3	1	1	1/3	1/3	1	3	3	3	5	1/7	1/5	1/3	1

Tableau 34- Ordonnancement des variables pour l'hypothèse « Sols couverts »

Avec:

C1 : Précédent cultural : prairie

C2 : Précédent cultural : céréales

C3 : Précédent cultural : maïs

SN1 : Occurrence des sols nus à peu couvert : aucun sol nu à peu couvert détecté

SN2 : Occurrence des sols nus à peu couvert : 1 sol nu à peu couvert détecté

SN3 : Occurrence des sols nus à peu couvert : 2 sols nus à peu couverts détectés

SN4 : Occurrence des sols nus à peu couvert : 3 sols nus à peu couverts détectés

BV1 : Evolution des sols nus à peu couverts par sous bassins versants : baisse des sols nus à peu couverts entre l'hiver 2003 et 2001

BV2 : Evolution des sols nus à peu couverts par sous bassins versants : évolution stable

BV3 : Evolution des sols nus à peu couverts par sous bassins versants : hausse des sols nus à peu couverts

Chapitre 4. Simulations prédictives de l'occupation hivernale des sols au-delà du site expérimental

entre les hivers 2003-2001

T1 : Taille du parcellaire comprise entre 0 et 0,5 ha

T2 : Taille du parcellaire comprise entre 0,5 et 1 ha

T3 : Taille du parcellaire comprise entre 1 et 2ha

T4 : Taille du parcellaire supérieure à 2 ha

	C1	C2	C3	SN1	SN2	SN3	SN4	BV1	BV2	BV3	T1	T2	T3	T4
C1	1	1/7	1/7	1/3	1/3	1/5	1/7	3	1	1/3	1	1	1/5	1/9
C2	7	1	1	9	3	1	1/3	5	3	3	7	3	1	1/3
C3	7	1	1	9	5	3	1	3	5	3	7	3	1	1/3
SN1	3	1/9	1/9	1	1/3	1/5	1/7	3	3	1	1	1/3	1/5	1/7
SN2	3	1/3	1/5	3	1	1/3	1/5	1	1	3	3	3	1/3	1/5
SN3	5	1	1/3	5	3	1	1/3	3	3	1	5	3	1	1/3
SN4	7	3	1	7	5	3	1	9	7	5	7	5	3	1
BV1	1/3	1/5	1/3	1/3	1	1/3	1/9	1	3	1/3	1	1/3	1/5	1/7
BV2	1	1/3	1/5	1/3	1	1/3	1/7	1/3	1	1/3	1	1/3	1/5	1/7
BV3	3	1/3	1/3	1	1/3	1	1/5	3	3	1	3	1	1/3	1/5
T1	1	1/7	1/7	1	1/3	1/5	1/7	1	1	1/3	1	1/3	1/5	1/7
T2	1	1/3	1/3	3	1/3	1/3	1/5	3	3	1	3	1	1/5	1/7
T3	5	1	1	5	3	1	1/3	5	5	3	5	5	1	1/5
T4	9	3	3	7	5	3	1	7	7	5	7	7	5	1

Tableau 35- Ordonnancement des variables pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts »

Avec:

C1 : Précédent cultural : prairie

C2 : Précédent cultural : céréales

C3 : Précédent cultural : maïs

SN1 : Occurrence des sols nus à peu couvert : aucun sol nu à peu couvert détecté

SN2 : Occurrence des sols nus à peu couvert : 1 sol nu à peu couvert détecté

SN3 : Occurrence des sols nus à peu couvert : 2 sols nus à peu couverts détectés

SN4 : Occurrence des sols nus à peu couvert : 3 sols nus à peu couverts détectés

BV1 : Evolution des sols nus à peu couverts par sous bassins versants : baisse des sols nus à peu couverts entre l'hiver 2003 et 2001

BV2 : Evolution des sols nus à peu couverts par sous bassins versants : évolution stable

BV3 : Evolution des sols nus à peu couverts par sous bassins versants : hausse des sols nus à peu couverts entre les hivers 2003-2001

T1 : Taille du parcellaire comprise entre 0 et 0,5 ha

T2 : Taille du parcellaire comprise entre 0,5 et 1 ha

T3 : Taille du parcellaire comprise entre 1 et 2ha

T4 : Taille du parcellaire supérieure à 2 ha

Les valeurs affichées représentent le poids relatif de chaque variable par rapport à une autre. Par exemple, pour l'hypothèse « sols couverts », la variable C1 apparaît « beaucoup plus importante » que la variable C2 ou C3. Au contraire, SN4 possède un poids « extrêmement moins important » que la variable T1. Pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts », les variables C2 et C3 apparaissent « beaucoup plus importantes » que la variable C1.

Plusieurs méthodes sont possibles pour calculer le poids de chaque variable à partir de cette analyse (Saaty, 1977). Celui-ci peut être obtenu par sommation de chaque colonne suivie de la division de chaque valeur par cette somme. On obtient alors :

A partir de la forme matricielle de chaque tableau, exprimée comme suit :

$$A = \begin{pmatrix} w_1 / w_2 & w_1 / w_2 & w_1 / w_3 & w_1 / w_4 \\ w_2 / w_1 & w_2 / w_2 & w_2 / w_3 & w_2 / w_4 \\ w_3 / w_1 & w_3 / w_2 & w_3 / w_3 & w_3 / w_4 \\ w_4 / w_1 & w_4 / w_2 & w_4 / w_3 & w_4 / w_4 \end{pmatrix}$$

on obtient ainsi :

$$B = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{\sum_i w_i} & \frac{w_1}{\sum_i w_i} & \frac{w_1}{\sum_i w_i} & \frac{w_1}{\sum_i w_i} \\ \frac{w_2}{\sum_i w_i} & \frac{w_2}{\sum_i w_i} & \frac{w_2}{\sum_i w_i} & \frac{w_2}{\sum_i w_i} \\ \frac{w_3}{\sum_i w_i} & \frac{w_3}{\sum_i w_i} & \frac{w_3}{\sum_i w_i} & \frac{w_3}{\sum_i w_i} \\ \frac{w_4}{\sum_i w_i} & \frac{w_4}{\sum_i w_i} & \frac{w_4}{\sum_i w_i} & \frac{w_4}{\sum_i w_i} \end{pmatrix}$$

Les poids de chaque variable définis en fonction des hypothèses sont représentés dans le tableau 36. Cette méthode, même si elle repose sur une approche subjective, s'avère pertinente en l'absence de connaissance experte, car elle permet de formaliser des connaissances imprécises et de mesurer leur fiabilité et de leur affecter un degré de confiance selon les hypothèses étudiées. Ainsi, même si les poids calculés pour chaque variable restent à manipuler avec précaution, ils offrent une mesure quantifiée des relations entre les différentes variables qui s'avèrent particulièrement utile dans l'affectation des jeux de masse.

Variables	Hypothèse « sols nus à peu couverts »	Hypothèse « sols couverts »
C1	0,072	0,511
C2	0,317	0,191
C3	0,400	0,191
SN1	0,097	0,500
SN2	0,147	0,237
SN3	0,241	0,328
SN4	0,583	0,048
BV1	0,079	0,114
BV2	0,068	0,082
BV3	0,134	0,069
T1	0,061	0,621
T2	0,118	0,271
T3	0,307	0,183
T4	0,687	0,148

Tableau 36- Poids de chaque variable pour les hypothèses « Sols couverts » et « Sols nus à peu couverts »

La définition des poids de chaque variable avec la méthode Saaty permet l'affectation de jeux de masse pour chacune des hypothèses considérées. Dans le cadre de la DST, cette affectation est réalisée en prenant en compte l'incertitude représentée par l'union des hypothèses (Tableau 37).

Pour cette application, les niveaux d'incertitude apparaissent globalement plus élevés que pour l'expérimentation effectuée sur le bassin versant du Yar où la base de connaissance est à la fois plus conséquente et plus précise. On remarque d'ailleurs qu'une masse non négligeable est associée au sous-ensemble « incertitude » pour la variable « évolution des sols nus » qui dans la hiérarchisation des facteurs s'avère la moins informative. L'incertitude et l'imprécision associée à cette variable est due au fait qu'elle est décrite seulement à l'échelle sous bassins versant.

Facteurs	Classes	Hypothèse sols nus à peu couverts	Hypothèse sols couverts	Incertitude
Précédents culturels	1 : prairie	0,05	0,50	0,45
	2 : céréales	0,35	0,20	0,45
	3 : maïs	0,40	0,20	0,40
Occurrence des sols nus à peu couverts	1 : sols couverts tous les hivers	0,01	0,50	0,49
	2 : sols nus à peu couverts durant 1 hiver	0,15	0,30	0,45
	3 : sols nus à peu couverts durant 2 hivers	0,25	0,30	0,45
	4 : sols nus à peu couverts durant 3 hivers	0,60	0,10	0,30
Evolution entre les sous bassins	1 : Baisse des sols nus à peu couverts	0,01	0,15	0,84
	2 : Pas ou peu d'évolution	0,05	0,10	0,85
	3 : Augmentation des sols nus à peu couverts	0,15	0,05	0,80
Taille	1 :] 0 ; 0.5 ha]	0,05	0,65	0,30
	2 :] 0.5 ; 1 ha]	0,10	0,30	0,60
	3 :] 1 ; 2 ha]	0,30	0,20	0,50
	4 :] > 2 ha	0,70	0,15	0,15

Tableau 37 -Affectation des jeux de masse dans le cadre de la théorie de Dempster-Shafer

4.3.2. Les résultats obtenus avec la théorie de Dempster-Shafer

4.3.2.1. Les prédictions basées sur les probabilités pignistiques

L'ensemble des jeux de masses définis est combiné à travers la règle de fusion Dempster-Shafer qui s'exprime comme suit:

$m(\emptyset) = 0$ et $\forall C \neq \emptyset$ et tel que $C \subseteq \Theta$, on obtient :

$$m(C) \equiv [m_1 \oplus m_2](C) = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A)m_2(B)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)}$$

Parmi les différentes mesures de crédibilité produites par la règle de fusion de Dempster-Shafer, les probabilités pignistiques qui permettent d'effectuer des mesures intermédiaires entre la croyance et la plausibilité sont analysées ici (Tableaux 38 et 39).

Mesure de probabilité pignistique	Parcelles	Surface (ha)
< 0,1	7606	7790
0,1 – 0,2	5889	6352
0,2 – 0,5	8499	9172
0,5 – 0,7	2668	3268
> 0,7	1617	2233

Tableau 38– Mesures pignistiques avec DST pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts »

Environ 5500 ha ont une probabilité forte ou très forte d'être en « sols nus à peu couverts » durant l'hiver 2003-2004, c'est-à-dire avec une probabilité pignistique supérieure à 0,5. Cette évaluation de surface apparaît ainsi cohérente avec les surfaces de sols nus à peu couverts mesurés durant les hivers précédents à partir d'images satellites. On remarque également que près de 7800 ha sont caractérisés par une valeur de probabilité inférieure à 0,1, indiquant que ces parcelles ont une probabilité très faible d'évoluer en sols nus à peu couverts.

Mesure de probabilité pignistique	Parcelles	Surface (ha)
< 0,1	389	475
0,1 – 0,2	1449	1610
0,2 – 0,5	3969	5048
0,5 – 0,7	4946	5610
> 0,7	15526	16072

Tableau 39– Mesures pignistiques avec DST pour l'hypothèse « sols couverts »

Une majorité des parcelles du bassin versant du Scorff (56% de la surface) ont une probabilité très forte d'évoluer en sols couverts (probabilité pignistique supérieure à 0,7). En

revanche, contrairement à l'hypothèse « Sols nus à peu couverts », très peu de parcelles sont concernées par une très faible probabilité de ne pas évoluer en sols couverts, puisque seulement 389 parcelles, soit 475 ha sont affectées d'une probabilité pignistique inférieure à 1. Ces mesures, là encore, correspondent bien à l'état de surface hivernal du bassin versant du Scorff mesuré les hivers précédents.

L'analyse conjointe des hypothèses montre cependant qu'un nombre conséquent de parcelles est caractérisé par de faibles mesures de croyance. Ainsi, 5363 ha (soit 4867 parcelles) ont des mesures de probabilités pignistiques pour les deux hypothèses envisagées inférieures à 0.6. Ces parcelles s'avèrent particulièrement intéressantes à analyser dans la mesure où les sources d'informations fusionnées ne permettent pas de fournir une probabilité significative sur une des hypothèses étudiées, leur évolution devient alors particulièrement incertaine. La surface du bassin versant étant trop importante pour une cartographie lisible de toutes les parcelles, un exemple de la répartition de ces parcelles à l'avenir incertain est donné sur la partie aval du bassin du Scorff (Figure 59).

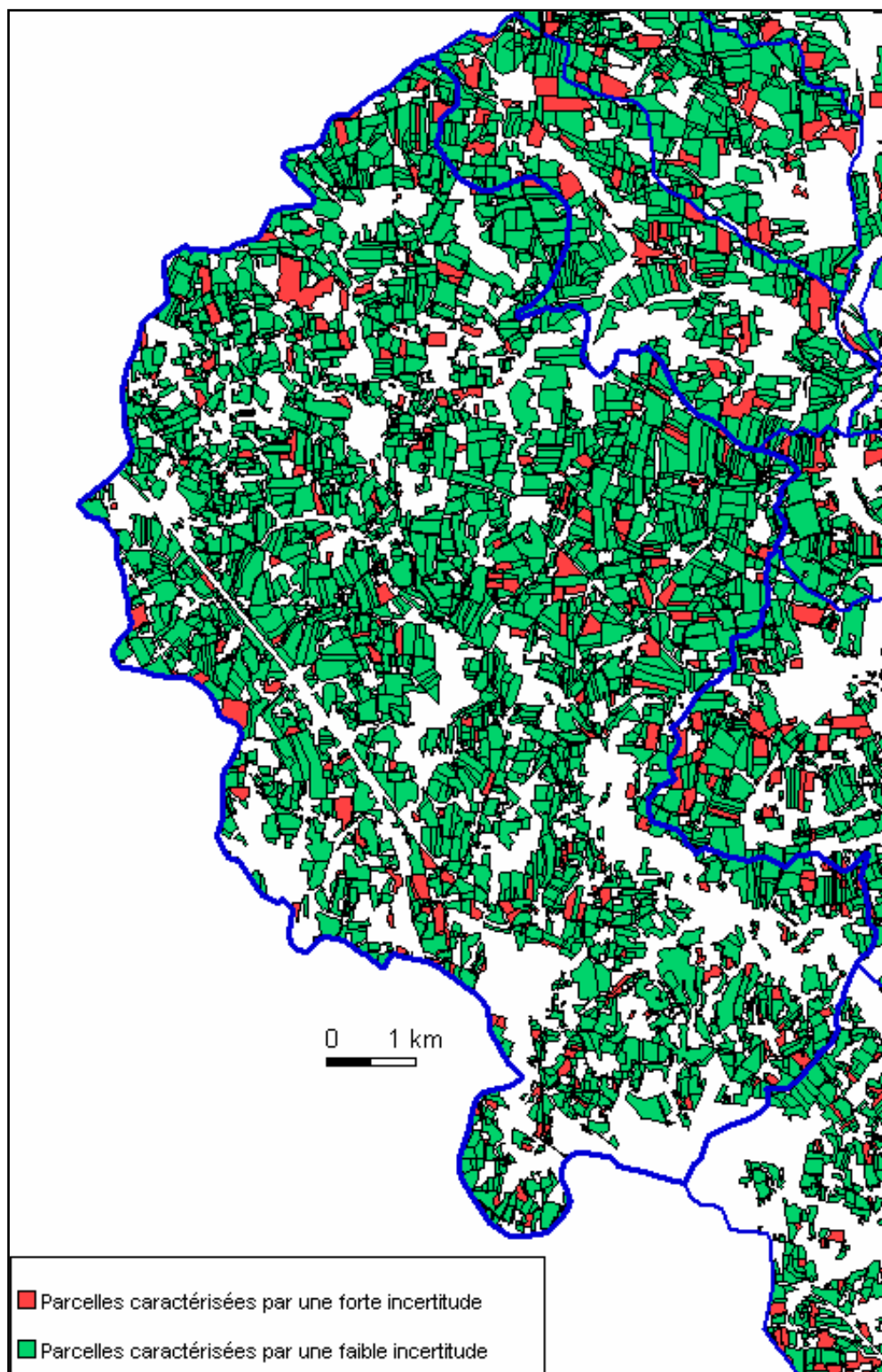


Figure 59- Niveau d'incertitude sur l'évolution de la couverture hivernale des sols pour l'hiver 2003-2004 à l'échelle parcellaire (Sous bassin-versant « Le Scave », bassin versant du Scorf)

4.3.2.2. La validation des prédictions à l'échelle parcellaire

Les niveaux de conflit entre les sources sont analysés dans un premier temps afin de mesurer la validité des résultats, un niveau de conflit trop important pouvant avoir des répercussions sensibles sur les prises de décision (Chapitre 3). Le calcul du conflit (k) entre les sources d'information se situe au niveau du dénominateur de la règle de fusion de Dempster-Shafer. Cette constante de normalisation (K) doit être non nulle :

$$K = 1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)$$

et

$$k = \sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_2(B)$$

La figure 60 présente les niveaux de cette constante de normalisation (K) pour l'ensemble du parcellaire du Scorff, une valeur proche de 1 indiquant un faible niveau de conflit entre les sources. On constate ainsi que les sources sont plutôt faiblement conflictuelles puisque seulement 16% du parcellaire à une constante de normalisation inférieure à 0,5.

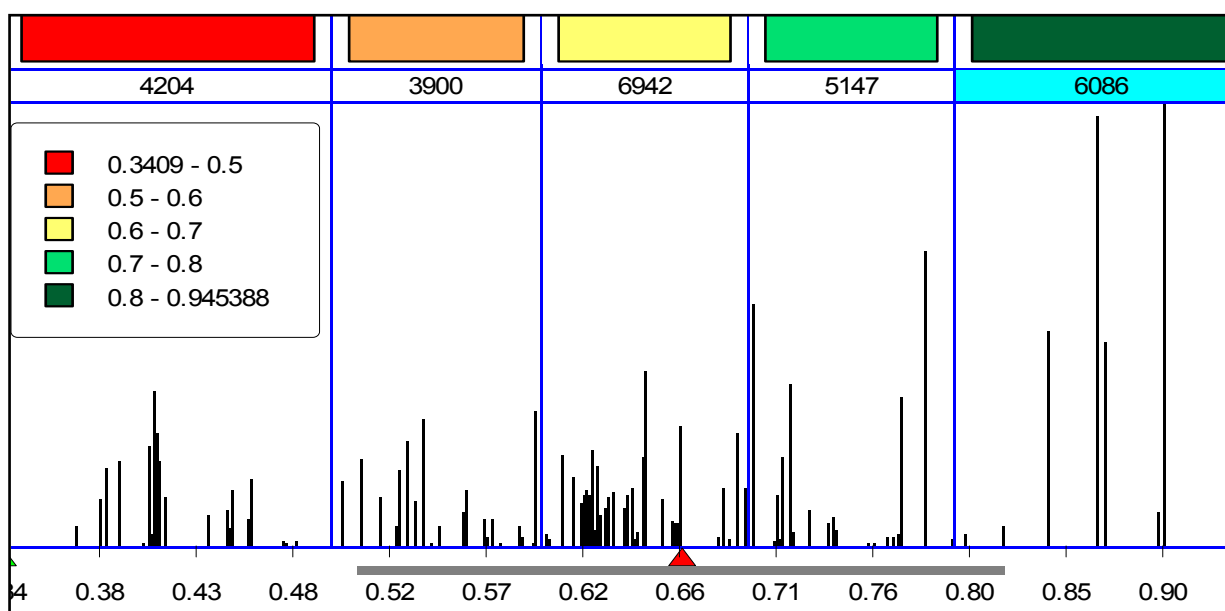


Figure 60- Mesure des conflits entre les sources d'information avec la règle de fusion de Dempster-Shafer

La prise de décision entre les différentes mesures de crédibilité produites par la règle de fusion est opérée à partir du maximum de probabilité pignistique calculé entre les deux hypothèses. Cette prise de décision est ensuite confrontée à la carte d'occupation hivernale des sols de l'hiver 2003-2004 dérivée de l'image satellitaire. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 40) :

	Occupation du sol pour l'hiver 2003/2004 (image satellite)	Prédiction avec la mesure de probabilité pignistique	Prise décision : maximum de probabilité pignistique
Sols nus à peu couverts	3609 ha	5502 ha	792 ha (22%)
Sols couverts	25 207 ha	23314 ha	20 497 ha (81,3%)
TOTAL	28816 ha	28816 ha	21289 ha (73,8%)

Tableau 40- Résultats de la prédiction de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Scorff pour l'hiver 2003-2004 avec la DST

Si les résultats obtenus pour l'hypothèse « Sols couverts » sont tout à fait satisfaisant au regard de l'incertitude associée aux données, ceux qui sont produits pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts », avec seulement 22% de prédictions effectuées correctement, s'avèrent, comme pour le bassin versant du Yar, nettement insuffisants. Ainsi, alors que l'estimation réalisée à partir des probabilités pignistiques reste correcte (Surfaces évaluées à 5500 ha pour 3600 en réalité), leur affectation spatiale reste très mauvaise. Deux raisons principales peuvent expliquer ce faible score : la première résulte de la baisse importante des sols nus à peu couverts pour l'hiver 2003-2004 qui ne totalisent « que » 3600 ha. Pour les hivers précédents, la moyenne des surfaces en sols nus à peu couverts sur l'ensemble du Scorff s'échelonnait autour de 5000-6000 ha. Ainsi, les actions menées par le syndicat du Scorff visant, entre autres, à augmenter l'implantation d'intercultures de type CIPAN après les cultures annuelles semblent donc concluantes. La deuxième raison provient du nombre élevé de parcelles étudiées (26 279) comparé au faible niveau d'information utilisé dans le processus de modélisation, qui s'avère insuffisant pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts ».

4.3.3. Les résultats obtenus avec la théorie de Dezert-Smarandache

Deux types de résultats sont produits avec la DSMT. Les premiers sont effectués à partir d'une affectation des jeux de masse identique à celle qui a été utilisée pour la DST, la valeur 0 étant ainsi associée au paradoxe. Pour les seconds, l'ensemble des masses auparavant attribuées à l'incertitude, est associé à l'intersection des hypothèses, exprimant ainsi la nature paradoxale d'une partie des sources d'information. Cette affectation de masse au paradoxale dans un contexte incertain se justifie dans la mesure où même si les sources apparaissent faiblement conflictuelles, celui-ci reste important pour près de 4200 d'entre elles (Figure 60). L'intégration du paradoxale dans le processus de fusion, apte à gérer cet aspect entre les données peut ainsi potentiellement augmenter les taux de prédictions correctes.

4.3.3.1. Les résultats issus d'une affectation identique des jeux de masse

L'ensemble de ces jeux de masse est fusionné à travers la règle de DSMT qui se définit à partir de la combinaison des jeux de masses individuels généralisés $m_1(.)$ et $m_2(.)$ par la règle suivante :

$$\forall C \in D^{\Theta}, m(C) = [m_1 \oplus m_2](C) = \sum_{A, B \in D^{\Theta}, A \cap B = C} m_1(A) m_2(B)$$

La DSMT fournit des résultats identiques à ceux qui ont été obtenus avec la DST et ne sont donc pas commentés. Cette similarité s'explique par le fait que le degré de conflit entre les hypothèses est plutôt faible

Une analyse des probabilités pignistiques montre malgré tout des différences importantes (Tableaux 41 et 42). Les mesures de probabilité pignistique avec la règle de fusion de DSMT se caractérisent pour l'hypothèse « Sols Couverts », par de fortes valeurs, ainsi, 94% des parcelles ont des valeurs supérieures à 0.7, c'est-à-dire une très forte crédibilité d'être prédite en « Sols Couverts ». Pour l'hypothèse « Sols Nus à peu Couverts », cette proportion de très forte crédibilité (60% avec DSMT) est également beaucoup plus importante qu'avec la DST (6%). Ces valeurs de probabilités pignistiques pour chaque hypothèse traduisent une forte ambiguïté entre les sources, les différences entre les mesures de probabilité pignistique étant comprise entre -0.15 et 0.16 (Figure 61). Elles produisent cependant, par le niveau élevé de confiance pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts » des prédictions correctes pour cette dernière.

Mesure de probabilité pignistique	Parcelles	Surface (ha)
< 0,1	0	0
0,1 – 0,2	1516	1623
0,2 – 0,5	6	8
0,5 – 0,7	8904	9446
> 0,7	15853	17738

Tableau 41- Mesures pignistiques avec DSMT pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts »

Mesure de probabilité pignistique	Parcelles	Surface (ha)
< 0,1	0	0
0,1 – 0,2	0	0
0,2 – 0,5	1522	1631
0,5 – 0,7	0	0
> 0,7	24757	27185

Tableau 42- Mesures pignistiques avec DSMT pour l'hypothèse « sols couverts »

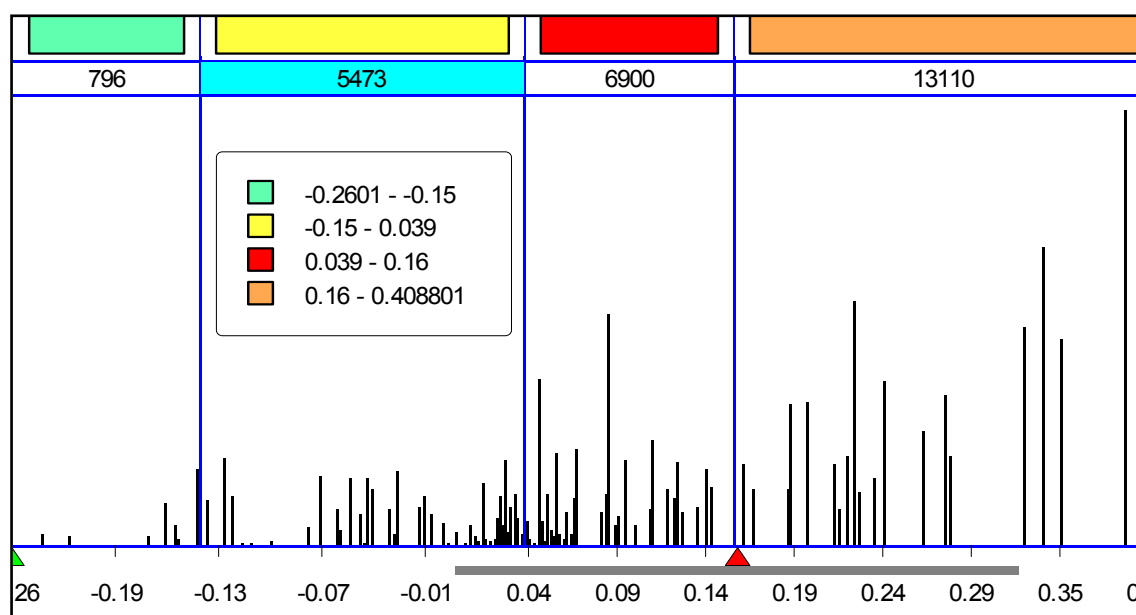


Figure 61- Différences pignistiques mesurées sur le parcellaire du Scorff, entre les hypothèses « sols nus à peu couverts » et « sols couverts » avec la DSMT

4.3.3.2. Les résultats issus du transfert des masses de l'incertitude sur le paradoxe

Les masses affectées à l'incertain sont ici transférées au sous-ensemble paradoxe (Tableau 43). Une analyse des probabilités pignistiques pour chaque hypothèse relève une très forte ambiguïté entre les sources puisque les différences sont très faibles et comprises entre - 0.010 et 0.018. Les incertitudes pour chaque prise de décision apparaissent ainsi encore plus importantes que dans l'application précédente, les parcelles ayant une probabilité très forte

d'évoluer indifféremment vers un sol couvert ou un sol nu à peu couvert. Ceci démontre que les sources d'information ne sont pas suffisamment informatives pour prédire avec un degré de fiabilité élevé l'évolution de la couverture hivernale des sols sur ce bassin versant.

Facteurs	Classes	Hypothèse sols nus à peu couverts	Hypothèse sols couverts	Incertitude	Paradoxe
Précédents culturels	1 : prairie	0,05	0,50	0	0,45
	2 : céréales	0,35	0,2	0	0,45
	3 : maïs	0,4	0,2	0	0,4
Occurrence des sols nus à peu couverts	1 : sols couverts tous les hivers	0,01	0,5	0	0,49
	2 : sols nus à peu couverts durant 1 hiver	0,15	0,3	0	0,45
	3 : sols nus à peu couverts durant 2 hivers	0,25	0,30	0	0,45
	4 : sols nus à peu couverts durant 3 hivers	0,6	0,10	0	0,3
Evolution entre les sous bassins	1 : Baisse des sols nus à peu couverts	0,01	0,15	0	0,84
	2 : Pas ou peu d'évolution	0,05	0,10	0	0,85
	3 : Augmentation des sols nus à peu couverts	0,15	0,05	0	0,8
Taille	1 :] 0 ; 0.5 ha]	0,05	0,65	0	0,3
	2 :] 0.5 ; 1 ha]	0,10	0,30	0	0,6
	3 :] 1 ; 2 ha]	0,3	0,2	0	0,5
	4 :] > 2 ha	0,7	0,15	0	0,15

Tableau 43-Affectation des jeux de masse dans le cadre de la théorie de Dezert-Smarandache

Les résultats de l'intersection des prédictions à l'échelle parcellaire avec la carte d'occupation du sol de l'hiver 2003/04 sont présentés dans le tableau 44. On note que pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts » les résultats obtenus, avec la DSmT, sont moins bons puisque seulement 9,3% des prédictions de sols nus à peu couverts sont correctement distribuées spatialement. La prédiction pour cette hypothèse apparaît par ailleurs globalement

Chapitre 4. Simulations prédictives de l'occupation hivernale des sols au-delà du site expérimental

sous-estimée, 2445 ha ayant été prédits en sols nus à peu couverts comparativement au 3609 ha détectés sur l'image satellitaire. Cette très faible prédiction profite logiquement à l'hypothèse « sols couverts » où près de 92% des prédictions sont correctement effectuées, offrant ainsi une précision globale pour les deux hypothèses d'environ 81%.

	Occupation du sol pour l'hiver 2003/2004 (image satellite)	Prédiction avec la mesure de probabilité pignistique	Prise décision : maximum de probabilité pignistique
Sols nus à peu couverts	3609 ha	2445 ha	338 ha (9,3%)
Sols couverts	25 207 ha	26371 ha	23 099 ha (91,6%)
TOTAL	28816 ha	28816 ha	23437 ha (81,3%)

Tableau 44- Résultats de la prédiction de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Scorff pour l'hiver 2003-2004 avec la DSMT

Conclusion

Le processus de modélisation appliqué sur le bassin versant du Scorff offre donc des résultats mitigés selon les hypothèses envisagées.

Pour l'hypothèse « sols couverts » les résultats sont satisfaisants. Les taux de prédiction correcte variant de **79 à 92%** selon les règles de fusion utilisées, montrent la pertinence du choix et de la pondération des facteurs de changement pour cette hypothèse. Les probabilités pignistiques, calculées pour chaque hypothèse, s'avèrent être également une mesure intéressante. A l'échelle du bassin versant du Scorff, elles offrent en effet des estimations d'occupation des sols proches de la réalité, dans le cadre de la DST notamment.

Les prédictions effectuées pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts » restent en revanche insuffisantes, en particulier en ce qui concerne la distribution spatiale des parcelles. Une des explications repose sur l'identification des facteurs de changements, qui, pour le bassin versant du Scorff, est basée uniquement *sur l'exploitation et l'analyse d'images satellitaires et sur un suivi relativement court* par rapport au bassin expérimental du Yar. Or, sur un bassin versant de la taille du Scorff (plus de 26 279 parcelles sur 28 000 ha de SAU), caractérisé par une diversité des systèmes de production agricoles importante (systèmes hors-sols, laitiers, légumiers,...), les dynamiques spatio-temporelles de la couverture hivernale des sols sont très variées et dépendantes de facteurs de type économique, agronomique, climatique,... qui n'ont pour cette étude, pas été pris en compte, sinon pour partie de façon indirecte et mesurée non à l'échelle de la parcelle mais du sous bassin versant. Des informations dérivées des seuls changements d'occupation et d'utilisation des sols passés s'avère ainsi trop limitative pour déterminer l'affectation des « sols nus à peu couverts » à l'échelle parcellaire, qui ne représentent que 10 à 15 % de la surface totale du bassin versant. *Ainsi, l'acquisition de données socio-économiques à l'échelle des exploitations agricoles et l'intégration permettrait-elle probablement d'améliorer sensiblement les résultats.*

Les règles de fusion de la DST et de la DSMT produisent pour cette expérimentation caractérisée par de faibles conflits des résultats similaires dans le cas où aucune masse n'est associée au paradoxe. En revanche, le transfert du jeu de masse de l'incertain vers le paradoxe permet une prédiction correcte globale sensiblement supérieure de la DSMT sur la DST (73,8% pour la DST et 81,3% pour la DSMT) au détriment, cependant de l'hypothèse « sols nus à peu couverts ». *Les deux théories, pour ce genre d'application caractérisée par de hauts niveaux d'incertitude s'avèrent ainsi plus ou moins équivalentes.*

Conclusion générale

Il est aujourd'hui couramment admis, s'il est nécessaire, à l'échelle du bassin versant, d'identifier et de suivre les changements de systèmes et/ou de pratiques culturales pouvant avoir un impact significatif sur les transferts de flux polluants. La détermination des modes d'occupation et d'usage des terres et son suivi permettent d'ailleurs d'évaluer les actions entreprises dans le cadre de programmes de restauration de la qualité de l'eau. La prédiction de leur évolution permettrait, quant à elle, la programmation d'actions visant à modifier les usages des sols et des pratiques agricoles dans le cadre des mêmes programmes. En particulier, la prédiction à court terme de la couverture hivernale des sols, qui joue un rôle important et reconnu sur la qualité de la ressource en eau, pourrait constituer un outil d'aide à la localisation d'îlots parcellaires susceptibles de rester ou de se retrouver sans couverture végétale l'hiver suivant.

Toutefois, la modélisation prédictive du devenir de l'occupation/utilisation des sols soulève un certain nombre de problèmes méthodologiques, rencontrés au niveau du choix du modèle destiné à produire les prédictions, et à chacune des étapes du processus de modélisation lui-même : pour la détermination des changements passés et des facteurs qui les ont motivé, la désignation du poids respectifs des facteurs en jeu dans l'évolution passée et future, pour la formulation d'hypothèses sur le devenir des territoires, pour la prise de décision sur les hypothèses formulées et enfin pour la validation des prédictions produites. De plus, la disponibilité et la qualité des données permettant d'alimenter le modèle est une préoccupation additionnelle dans ce type d'approche.

Dans le cas particulier de la couverture hivernale des sols, les problèmes relèvent en premier lieu de son caractère incertain et imprécis, sa nature et son taux de couverture présentant de multiples états selon le type de culture ou d'inculture implanté et son stade phénologique qui dépend des dates de semis, du contexte météorologique...Par ailleurs, les données qui permettent de déterminer les couverts végétaux hivernaux et leurs dynamiques spatio-temporelles, et qui sont, à l'échelle des bassins versants essentiellement des images de télédétection, présentaient jusqu'à l'arrivée des capteurs à très haute résolution de fortes limites pour la détermination précise des taux de couverture des parcelles et l'identification des types de couverts implantés (une évaluation d'une scène SPOT 5 a permis de mettre en évidence l'intérêt de ce type d'image pour une étude détaillée de la couverture hivernale). Enfin, les facteurs qui motivent son évolution passée et à venir sont multiples et assez mal connus. En conséquence, les simulations effectuées doivent prendre en compte l'ensemble de

ces imprécisions et incertitudes. De plus, ces dernières conduisent à faire le choix d'une méthode permettant d'associer un niveau d'incertitude ou degré de confiance aux résultats produits.

Parmi les nombreuses approches permettant de modéliser de façon prédictive les changements d'occupation du sol, une approche dite « approximative » autorisant la gestion de l'incertitude et de l'imprécision tout au long du processus de modélisation a été privilégiée. Parmi les approches approximatives, le modèle de « type expert » est apparu comme étant le plus pertinent pour la prédiction de la couverture hivernale des sols, car il permet entre autres, de combiner des informations très hétérogènes de type qualitatives incluant des connaissances expert et des informations quantitatives, ce qui s'avère d'ailleurs souvent nécessaire pour simuler de façon vraisemblable l'évolution future de l'utilisation des sols. Par ailleurs, la combinaison des différents facteurs identifiés a été effectuée par des règles de fusion de type probabiliste intégrant l'incertitude dans la gestion des sources d'information et dans la production des résultats. A ce titre, la règle de fusion de Dempster-Shafer est apparue *a priori* comme étant bien adaptée pour satisfaire ces conditions car elle gère à la fois l'incertitude liée aux données d'entrée et formalise cette notion à l'aide de fonctions de croyance, de plausibilité et associe un niveau de confiance aux résultats produits.

L'application de la règle de Dempster-Shafer sur le site expérimental du bassin versant du Yar pour effectuer des prédictions à court terme sur les hypothèses 'Sols nus à peu couverts' et « Sols couverts » a produit des résultats contrastés selon les hypothèses : ils apparaissent très faibles pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts » (35% de bonnes prédictions) et plutôt bons pour l'hypothèse « Sols couverts » (80% de bonnes prédictions). Une analyse détaillée des résultats a permis de constater que les sources d'informations utilisées pour prédire la couverture hivernale des sols étaient fortement conflictuelles, voire contradictoires pour certaines d'entre elles. Face à ce constat, une théorie récente, appelée la théorie de Dezert-Smarandache, développée pour entre autres, gérer cet aspect de la fusion de données que la théorie des évidences de Dempster-Shafer ne permet pas d'appréhender, a été utilisée sur le même site expérimental. Cette théorie permet de représenter et combiner des sources d'informations de nature à la fois incertaines et paradoxales dans le sens où elles peuvent soutenir conjointement plusieurs hypothèses. Cette nouvelle approche de la fusion de données s'est montrée intéressante pour notre application : la délimitation de la couverture hivernale des sols en deux classes « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » est par nature ambiguë, et par conséquent certaines sources d'information peuvent paradoxalement soutenir indifféremment les deux hypothèses. Les résultats produits à partir de l'application de cette théorie présentent notamment un meilleur taux de prédiction que ceux qui ont été produits à partir de la théorie de Dempster-Shafer, avec 60% de bonnes prédictions pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts ».

Afin d'évaluer la reproductibilité de cette approche dans des conditions plus standards que celles du bassin versant expérimental, la démarche de modélisation définie sur le bassin versant du Yar a été appliquée sur un site d'étude plus étendu et pour lequel la base de données disponible est nettement moins importante, en l'occurrence le bassin versant du Scorff. Sur ce site, les théories de Dempster-Shafer et de Dezert-Smarandache offrent exactement les mêmes niveaux de prédiction dans le cas d'une affectation identique du jeu de masse aux sources d'information, dans la mesure où les conflits entre ces sources sont faibles. Si les changements prédits sont correctement évalués quantitativement pour les deux hypothèses à l'échelle du bassin versant, leur localisation spatiale reste problématique pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts », 22% des surfaces étant correctement localisées. En revanche, l'hypothèse « sols couverts » apparaît bien modélisée avec un taux de prédiction correctement localisé à 74%. Ce taux passe à près de 92% pour cette hypothèse et à 9% seulement pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts » lorsque, dans le cadre de Dezert-Smarandache, l'affectation des jeux de masse de l'incertain est transposé sur le paradoxe.

Les résultats issus du processus de la modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols montrent également que l'aspect incertain associé au processus de modélisation offre un complément d'information intéressant. Ainsi, il devient possible d'identifier les parcelles pour lesquelles les mesures d'incertitude sont trop élevées, pour prédire de façon fiable l'évolution du couvert hivernal. Ces mesures indiquent aussi que les sources d'information utilisées sont soit incomplètes ou peu fiables. Les niveaux de prédiction peuvent ainsi être améliorés par l'apport de nouvelles sources d'information. Dans le temps, l'introduction de sources d'information dans le processus de modélisation réduit le niveau d'incertitude, faisant ainsi croître la fiabilité des prédictions.

Ces résultats mettent en exergue la difficulté de modéliser un phénomène spatial restreint d'un point de vue géographique, puisque les « sols nus à peu couverts » couvrent en hiver généralement moins de 25% de la surface totale des bassins versant étudiés en Bretagne. La forte variabilité spatiotemporelle de la classe « sols nus à peu couverts » entre les hivers est le facteur principal des faibles taux de prédiction correctes obtenus. Une meilleure prédiction de cette classe requiert non seulement la prise en compte de facteurs conjoncturels, tels que les facteurs climatiques non considérés dans ce travail -qui doivent être pris en compte pour une optimisation de la prédiction- mais également une analyse spatiale plus détaillée des changements passés observés. Le développement actuel de nouveaux satellites de très haute résolution spatiale et temporelle (Système « Pléiade ») offre à cet égard des perspectives de recherche encourageantes pour détecter et suivre l'évolution de la couverture hivernale des sols. L'acquisition durant l'hiver, de plusieurs images satellites à très haute résolution spatiale permettra une discrimination plus fine de la nature et des états de la couverture hivernale des sols (intercultures, céréales, ...). L'intégration de ces données dans

des processus de modélisation permettra également d'émettre des hypothèses plus précises sur le devenir de la couverture végétale des sols.

Ces gains de précision s'avèrent utiles, essentiels même, pour de nombreuses collectivités locales afin de valider les actions menées sur les couverts végétaux en hiver ; Ils le sont aussi pour optimiser les résultats d'autres modèles tels que les modèles agro-hydrologiques de transferts de flux.

Liste des figures

- **Figure 1-** Cadre conceptuel de l'occupation et de l'utilisation des sols (Hubert-Moy, 2004)
- **Figure 2-** Causes et conséquences des changements d'occupation et d'utilisation des sols
- **Figure 3-** Représentation schématique des échelles de temps et d'espace auxquels les modes d'occupation et d'utilisation des sols sont étudiés par télédétection (d'après Hubert-Moy, 2004)
- **Figure 4-** Variation des classes d'occupation du sol entre 1992 et 2002 (Agreste, 2003)
- **Figure 5-** Variation du nombre d'exploitations agricoles et de la surface agricole utile entre 1955 et 2000 (Source : Bretagne Environnement, 2003)
- **Figure 6-** Excédent azoté de la fertilisation minérale en Bretagne en 2001(source : Agreste Bretagne, 2003)
- **Figure 7-** Concentration moyenne en nitrates en Bretagne (Source : DIREN, Bretagne, Agence de l'Eau Loire-Bretagne)
- **Figure 8-** Fréquence de dépassement du seuil réglementaire de 0,1µg/l pour les molécules les plus fréquemment repérées dans l'eau des rivières du réseau CORPEP (in Hubert-Moy,2004 ; source : Bretagne-Environnement, 2003)
- **Figure 9-** Une grande variété des états de surface de la couverture hivernale des sols (Bassin versant du Yar, janvier 2003)
- **Figure 10-** Prise de décision avec une fonction floue (d'après Eastman, 2003)
- **Figure 11-** Organisation d'un réseau de neurones (Chiari *et al.*,2002)
- **Figure 12-** Prise en compte de l'incertitude dans un processus de modélisation d'un phénomène
- **Figure 13-** Sous-ensembles d'un cadre de discernement Θ composé de trois hypothèses A, B et C
- **Figure 14-** Exemple de fusion de données avec la théorie de Dempster-Shafer
- **Figure 15-** Localisation du site d'étude (Bassin-versant du Yar)
- **Figure 16-** Evolution des échouages d'algues vertes depuis 1994 dans la baie de Lannion (Source : CEVA)
- **Figure 17-** Systèmes de production sur le bassin versant du Yar (Etat en 1998, Conseil Général des Côtes d'Armor)
- **Figure 18-** Processus des traitements radiométriques avec le modèle 5S
- **Figure 19-** Méthodologie du processus de modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols appliquée sur le bassin du Yar
- **Figure 20-** Seuillage du NDVI sur le bassin versant du Yar en janvier 2001
- **Figure 21-** Evaluation des surfaces en sols nus à très peu couverts en fonction du seuillage de l'indice NDVI (SAU Bassin versant du YAR, image SPOT 5 du 24/01/2003) ; La classe entourée de rouge est la classe référence (Seuil déterminé en fonction des parcelles tests <10% de couvert végétal)

- **Figure 22-** Extrait de l'image SPOT 5 du 24/01/2003 (Fusion P. à 5m + Xi à 10m)
- **Figure 23-** Relation entre le TSAVI calculé à partir de l'image SPOT du 24/01/2003 et le taux de couverture du sol par la végétation observée sur le terrain
- **Figure 24-** Part relative de chaque type de couvert végétal hivernal en fonction du taux de couverture du sol par la végétation
- **Figure 25-** Signatures spectrales de différents types de couverts hivernaux à partir d'une image SPOT5 (Bassin versant du Yar, 24/01/2003)
- **Figure 26-** Scores de classifications de différents couverts hivernaux en fonction de la densité de couvert végétal
- **Figure 27-** Méthodologie de l'analyse des vecteurs de changements (AVC) calculés entre deux hivers
- **Figure 28-** Evolution des niveaux de changement de couverture des sols entre les hivers étudiés
- **Figure 29-** Occurrence des sols nus à peu couverts sur le bassin versant du Yar (1996-2003)
- **Figure 30-** Echelles spatiales et facteurs de changements de l'occupation du sol
- **Figure 31-** Dynamiques temporelles des changements d'occupation du sol pendant l'hiver
- **Figure 32-** Variations de la présence de couvert végétal en hiver selon les variables explicatives désignées par les experts (analyse réalisée pour l'hiver 2002-2003)
- **Figure 33-** Entropie entre les classes de la variable « Occurrences des sols nus à peu couverts » et la variable « Présence du couvert hivernal pour l'hiver 2002-2003 » sur le bassin versant du Yar.
- **Figure 34-** Etapes de la création des « groupes de solutions » par classification descendante
- **Figure 35-** Répartition des niveaux de probabilités pignistiques pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts »
- **Figure 36-** Croisement de la vérité terrain de l'hiver 2001/2002 avec la carte de prédiction pour les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts »
- **Figure 37-** Carte de « véracité » mesurant les niveaux d'incertitude et les résultats de la prédiction confrontée avec le terrain pour les deux hypothèses
- **Figure 38-** Relation entre les niveaux de conflit pour les hypothèses « Sols nus à peu ouverts » et « Sols couverts » et les résultats de la prédiction avec la théorie de Dempster-Shafer
- **Figure 39-** Répartition des jeux de masse selon les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » pour les sols couverts correctement prédits avec la règle de fusion de Dempster-Shafer
- **Figure 40-** Répartition des jeux de masse selon les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » pour les sols couverts prédits de façon erronée avec la règle de fusion de Dempster-Shafer
- **Figure 41-** Répartition des jeux de masse selon les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » pour les sols nus à peu couverts correctement prédits avec la règle de fusion de Dempster-Shafer

- **Figure 42-** Répartition des jeux de masse selon les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » pour les sols nus à peu couverts prédits de façon erronée avec la règle de fusion de Dempster-Shafer
- **Figure 43-** Repousse spontanée de la végétation sur des chaumes de céréales (Bassin-versant du Yar, hiver 2001-2002).
- **Figure 44-** Interculture nécrosée par une gelée précoce
- **Figure 45-** Processus de modélisation prédictive de l'évolution de la couverture hivernale des sols avec les théories de Dempster-Shafer et Dezert-Smarandache
- **Figure 46-** Affectation de fonctions de masse de type floue pour l'évidence « Taille des parcelles »
- **Figure 47-** Affectation de fonctions de masse de type floue pour l'évidence « Distance au siège des exploitations »
- **Figure 48-** Distribution spatiale de la validation des prédictions pour les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols Couverts »
- **Figure 49-** Localisation du bassin versant du Scorff
- **Figure 50-** Typologie agricole sur le bassin versant du Scorff (source : Syndicat du Scorff, 1996)
- **Figure 51-** Traitements effectués sur les images hivernales, exemple de l'hiver 2001/2002 (Bassin versant du Scorff)
- **Figure 52-** Pourcentages de sols nus à peu couverts par sous-bassin versant par rapport à la SAU (Scorff, décembre 2001)
- **Figure 53-** Etapes de Traitement des images d'été (Bassin versant du Scorff)
- **Figure 54-** Evolution des sols nus à peu couverts par sous bassins versants entre les hivers 2001/02 et 2000/01
- **Figure 55-** Relation entre l'occurrence des sols nus à peu couverts au cours des hivers 2000-2001 et 2001-2002 et la proportion de sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003
- **Figure 56-** Relation entre l'évolution des sols nus à peu couverts au cours des hivers 2000-2001 et 2001-2002 par sous bassins versants et la proportion de sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003
- **Figure 57-** Relation entre la taille du parcellaire et la proportion de sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003
- **Figure 58-** Relation entre le précédent cultural observé au cours des hivers 2000-2001 et 2001-2002 et la proportion de sols nus à peu couverts au cours de l'hiver 2002-2003
- **Figure 59-** Niveau d'incertitude sur l'évolution de la couverture hivernale des sols pour l'hiver 2003-2004 à l'échelle parcellaire (Sous bassin-versant « Le Scave », bassin versant du Scorff)
- **Figure 60-** Mesure des conflits entre les sources d'information avec la règle de fusion de Dempster-Shafer
- **Figure 61-** Différences pignistiques mesurées entre les hypothèses « Sols nus à peu couverts » et « Sols couverts » avec la DSmT

Liste des tableaux

- **Tableau 1-** Différences entre les termes « Utilisation » et « Occupation » du sol pour la structuration et l'utilisation de données
- **Tableau 2-** Reconquête de la qualité de l'eau en Bretagne : échéancier des dispositions réglementaires concernant la réduction des pollutions d'origine agricole
- **Tableau 3-** Impact de la profondeur des sols sur le lessivage de l'azote (Comifer, 2002)
- **Tableau 4-** Calendrier agricole pour une succession culturale type des systèmes de production laitier sur trois années [1]
- **Tableau 5-** Calendrier agricole pour une succession culturale type des systèmes de production hors-sol sur quatre années [2]
- **Tableau 6-** Fertilisation totale des cultures sur le bassin versant du Yar en 1999 (Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999)
- **Tableau 7-** Données utilisées dans le cadre du processus de modélisation prédictive de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Yar (Hors images satellitaires, Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999)
- **Tableau 8-** Images satellitaires acquises et contrôles terrain associés
- **Tableau 9-** Estimation des modifications de couverture des sols entre les hivers 2000/2001 et 2001/2002 par l'analyse des vecteurs de changements.
- **Tableau 10-** Occupation du sol sur le bassin versant du Yar en janvier 2002
- **Tableau 11-** « Sols nus véritables » entre deux cultures, en ha et en % de la surface totale (1996-2001)
- **Tableau 12-** Hiérarchisation des facteurs de changement par système de production agricole.
- **Tableau 13-** Hiérarchisation des variables explicatives à partir de l'analyse par information mutuelle
- **Tableau 14-** Affectation des jeux de masse pour chaque hypothèse
- **Tableau 15-** Seuillage des probabilités pignistiques pour l'hypothèse « sols couverts »
- **Tableau 16-** Répartition des probabilités pignistiques pour les hypothèse « Sols couverts » et « Sols nus à peu couverts »
- **Tableau 17-** Résultats du croisement de la couverture hivernale des sols estimée par satellite et de la prédiction avec la théorie de Dempster-Shafer
- **Tableau 18-** Niveaux d'incertitudes et résultats de la prédiction pour les hypothèses sols nus à peu couverts et l'hypothèse sols couverts
- **Tableau 19-** Exemples de fusion de données avec la théorie de Dezert-Smarandache (DSmT « classique »)
- **Tableau 20-** Affectation des jeux de masses pour chaque hypothèse avec DSmT
- **Tableau 21-** Résultats de la règle de fusion de Dempster-Shafer et de Dezert-Smarandache
- **Tableau 22-** Affectation des jeux de masse au modèle de type « mixte » pour les parcelles inférieures à 1 ha et à 1 km, pour une prise décision avec DST en « Sols couverts ».

- **Tableau 23-** Prédiction de la couverture hivernale des sols avec la règle mixte contextuelle de Dezert-Smarandache
- **Tableau 24-** Approvisionnement en eau potable (Source : David, 1999)
- **Tableau 25-** Liste des images utilisées sur le bassin du Scorff
- **Tableau 26-** Occupation du sol sur le bassin versant du Scorff (décembre 2001)
- **Tableau 27-** Occupation du sol sur le bassin versant du Scorff en été 2002
- **Tableau 28-** Evolution de la couverture hivernale des sols pour les hivers 2000/01 et 2001/02
- **Tableau 29-** Evolution de l'occupation du sol entre les étés 2001 et 2002
- **Tableau 30-** Précédents culturels pour l'hiver 2001/02
- **Tableau 31-** Exemples de successions culturelles sur le Scorff (été2001/hiver 2001-2002/été2002)
- **Tableau 32-** Hiérarchisation des facteurs de changement à partir du test d'informations mutuelles entre les variables
- **Tableau 33-** Ordonnancement des critères en fonction de leur importance relative (Source : Saaty, 1977)
- **Tableau 34-** Ordonnancement des variables pour l'hypothèse « Sols couverts »
- **Tableau 35-** Ordonnancement des variables pour l'hypothèse « Sols nus à peu couverts »
- **Tableau 36-** Poids de chaque variable pour les hypothèses « Sols couverts » et « Sols nus à peu couverts »
- **Tableau 37-** Affectation des jeux de masse dans le cadre de la théorie de Dempster-Shafer
- **Tableau 38-** Mesures pignistiques avec DST pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts »
- **Tableau 39-** Mesures pignistiques avec DST pour l'hypothèse « sols couverts »
- **Tableau 40-** Résultats de la prédiction de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Scorff pour l'hiver 2003-2004 avec la DST
- **Tableau 41-** Mesures pignistiques avec DSmT pour l'hypothèse « sols nus à peu couverts »
- **Tableau 42-** Mesures pignistiques avec DSmT pour l'hypothèse « sols couverts »
- **Tableau 43-** Affectation des jeux de masse dans le cadre de la théorie de Dezert-Smarandache
- **Tableau 44-** Résultats de la prédiction de la couverture hivernale des sols sur le bassin versant du Scorff pour l'hiver 2003-2004 avec la DSmT

Références

- (1) Adams, J. B., M. O. Smith, and P. E. Johnson, 1986. Spectral mixture modeling; A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site,. *J. Geophys. Res.*, Vol. 91, pp 8098-8122.
- (2) Agarwal C. G., Green M., Grove J. M., Evans T., Schweik C., 2000. A review and assessment of land-use change models : Dynamics of space, time, and human choice. *Fourth International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4)*, September 2–8, Banff, Canada.
- (3) Aggrey A., Hunter Gary J., 2002. Responding to the consequences of uncertainty in geographical data, *International Journal Information Science*, Vol. 16, No 5, pp 405-417.
- (4) Agreste, 1997. *Tableaux de l'agriculture bretonne*, Direction régionale de l'Agriculture et de la forêt.
- (5) Agreste, 2003. *Tableaux de l'agriculture bretonne*, Direction régionale de l'Agriculture et de la forêt.
- (6) Alcamo J. (ed.), 1994. *IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Germany.
- (7) Allain C., 2000. *Echelles et télédétection; Application aux paysages et à l'occupation du sol en Bretagne orientale*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 2, 283 p.
- (8) Arrouays, D., J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana et P. Stengel (eds), 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France?* Expertise scientifique collective, Synthèse, INRA, 32 p.
- (9) Bachmann A., Allgöwer B, 2002. Uncertainty propagation in winland fire behaviour modelling, *International Journal Geographical Information Science*, Vol.16, No2, pp 115-127.
- (10) Balling R. J., Taber J. T., Brown M., Day K., 1999. Multiobjective urban planning using a genetic algorithm. *ASCE Journal of Urban Planning and Development*, Vol. 125, n°2, pp 86-99.
- (11) Baudry J., Al Jallad A, 1992. La théorie de l'information : un outil d'analyse des liaisons entre les variables, *Rapport CERESA*. 8 p.
- (12) Baudry J., Dupont C., Thenail C., Viaud V., 2004. Aménagement du paysage et pratiques agricoles : quelles combianisons dans le gestion des bassins versants? In « *Savoirs et savoir-faire sur les bassins versants ; Pollution de l'eau et dynamique de restauration de sa qualité en milieu rural* », 20, 21, 22 Avril 2004, Vannes, J.R. Lucas et L. Ligneau eds, pp 117-124.

- (13) Benoît M., Chicoisne G., Deffontaines J.-P., Hervé D., Lardon S., Le Ber F., Mullon C., Papy F., Souchère V., Thinon P., Tichit M., Treuil J.-P., 1998. Coordonner des choix de cultures sous contraintes environnementales : des jeux de rôle aux modèles multi-agents. In *Actes du Colloque SMAGET*, CEMAGREF, Clermont Ferrand, pp 133-141.
- (14) Beven K.J., Kirkby M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol Sci Bull*, Vol. 24, pp 43-69.
- (15) Billot M., 2000. *Analyse et modélisation des changements d'occupation du sol sur les Drains de Rennes I*, DEA Université de Rennes 2, 92 p.
- (16) Bishr Y., Pundt H., Kuhn W., Radwan M., 1999. Chapter 5. *Probing the concept of information communities -A first step toward semantic interoperability*, In *Interoperating Geographic Information Systems*. Edited by M.Goodchild, M. Egenhofer, R. Fegeas and C. Cottman (Dordrecht: Kluwer Academic)
- (17) Bloch I., Maître H., 1994. Fusion de Données en Traitement d'Images : modèles d'information et décisions. *Traitement du Signal*, vol. 6, pp 1811-1823.
- (18) Bonn F., Rochon G., 1992, *Précis de télédétection : principes et méthodes*, vol.1, Presse Universitaire du Québec, AUPELF, 485 p.
- (19) Bonnefoy, Bousquet, Rouchier, 2001, Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multiagents : pâture en forêt virtuelle, *L'espace géographique* n°1-2001, pp 13-25
- (20) Bracker H., 1996. Utilisation de la théorie de Dempster/Shافر pour la classification d'images satellitaires à l'aide de données multi-sources et multitemporelles. Thèse de l'université de Rennes I, 178 p.
- (21) Bretagne environnement, <http://www.bretagne-environnement.org/>
- (22) Briassoulis, H. 1999. *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches*. The Web Book of Regional Science, Regional Research Institute, West Virg. Univ. [http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/Chapter2\(Histoverview\).htm](http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/Chapter2(Histoverview).htm)
- (23) Brown D.G., DUH J.-D., 2004, Spatial simulation for translating from land use to land cover, *International Journal Geographical Information Science*, Vol.18, No 1, pp 35- 60.
- (24) Burrough P.A., Frank A.U., 1995. Concept and paradigms in spatial information: are current geographical systems truly generic? *International Journal of Geographic Information Systems*, 9(2), pp 101-116.
- (25) Calkins J.B., Swanson B.T., 1998. Comparison of conventional and alternative nursery field management systems : soil physical properties. *J. of Env. Hort.*, Vol. 16, pp 90-97.
- (26) Canévet C., 1992. *Le modèle agricole breton*. Presses Universitaires de Rennes, 397 p.

- (27) Caubel-Forget V., Grimaldi C., Rouault F., 2001. Contrasted dynamics of nitrate and chloride in ground water submitted to the influence of a hedge. *C.R. Acad. Sci.*, Série IIA, Sciences de la Terre et des Planètes, Vol. 332, pp 107-113.
- (28) Cecchini A., 1996. A cellular automaton and some specialized automata for urban modelling, *Environment and Planning B*, Vol.23, N°4, pp 721-732.
- (29) CERESA, 1987. L'érosion des terres agricoles dans le Massif Armoricaïn. Risques à l'échelle régionale et maîtrise du ruissellement lors d'opérations d'aménagement. Centre d'Etudes et de Recherches sur l'Environnement et les Sols pour l'Aménagement - Ministère de l'Environnement- Ministère de l'Agriculture, 33 p.
- (30) Champeaux J.L., Arcos D., Bazil E., Girard D., Goutorbe J.P., Habets J.P., Noilhan J., Roujean J.L., 2000. AVHRR- derived vegetation mapping over Western Europe for use in numerical weather prediction models, *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp 1235-1249.
- (31) Chamussy H., Charre J., Dumolard P., Durand M.G., Le Berre M., 1994. Initiation aux pratiques statistiques en géographie. Paris : Masson, 203 p.
- (32) Chaplot V., Walter C., Curmi P., 2000. Improving soil hydromorphic prediction according to DEM resolution and available pedological data. *Geoderma*, Vol. 97, pp 405-422.
- (33) Chiari, F., Delhom M., Filippi J.-B., Santucci J.-F. 2002. *Prédiction du comportement hydrologique d'un bassin versant à l'aide de Réseaux de Neurones*, Publication ESRI 2000.
- (34) Cheverry C., 1998. *Agriculture intensive et qualité des eaux*. INRA Ed., Versailles, 298 p.
- (35) Chuvieco E., 1993. Integration of linear programming and GIS for land-use modeling. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 7, n°1, pp 71-83.
- (36) Cisci G., Martinez V., 1993. Environmental impact of soil erosion under different cover and management systems. *Soil Technology*, Vol. 6, pp 239-249.
- (37) Comifer, 2002. *Lessivage des nitrates en systèmes de cultures annuelles, Diagnostic du risque et propositions de gestion de l'interculture*. Rapport, 60 p.
<http://www.comifer.asso.fr/publication/brochures.htm>
- (38) Congalton, 1994. Accuracy assessment of remotely sensed data: Future needs and directions, Proceedings of the Percora 12 Symposium: Land Information from Space-Based Systems, Sioux falls, South Dakota, *American Society of Photogrametric and Remote Sensing*, pp 385-388
- (39) Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999. Lutte préventive et curative contre la prolifération des algues vertes. Conception d'un programme d'actions préventives en Baie de Lannion.

- (40) -Analyse des différents éléments du diagnostic et cadrage du programme d'actions, SCE 102 p.
- (41) -Diagnostic approfondi des bassins versants du Yar et du Roscoat,, ENSAR, 60 p.
- (42) Corgne S., 2004. Hiérarchisation des facteurs de changements de l'occupation hivernale des sols Application au bassin versant du Yar (Bretagne). *Norais (In press)*.
- (43) Corgne S., Hubert-Moy L., Mercier G., Dezert J., 2004. Application of DSMT for Land Cover Land Prediction. in "*Advances and Applications of DSMT for Information Fusion (Collected works)*", F. Smarandache & J. Dezert ed., American Research Press, pp 371-382. <http://www.gallup.unm.edu/~smarandache/DSMT.htm>
- (44) Corgne S., Hubert-Moy L. Dezert J. Mercier G., 2003. Land cover change prediction with a new theory of plausible and paradoxical reasoning, *Proceedings. Fusion 2003 Conference, ISIF-IEEE*, 8-11 July, pp 1141-1148.
- (45) Corgne S., Hubert-Moy L., Barbier J., Mercier G., Solaiman B., 2002. Follow-up and modelling of the land use in an intensive agricultural watershed in France, *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology IV*, Manfred Owe, Guido d'Urso, Leonidas Toullos, Editors, *Proceedings of SPIE*, 4879, pp 342-351.
- (46) Corgne S., 2001. *Modélisation de l'évolution de la couverture hivernale des sols par télédétection ; Application au bassin versant du Yar (Baie de Lannion)*. DEA Université de Rennes 2, 98 p.
- (47) Cosandey C., Lavabre J., Martin C., Mathys N., 2002. Conséquences de la forêt méditerranéenne sur les écoulements de crue. Synthèse des recherches menées en France. *La Houille Blanche*, N°3-2002, pp 38-42.
- (48) Costanza R., Sklar F.H., DAY, J.W., 1986, Modeling Spatial and Temporal Succession in the Atchafalaya /terrebone Marsh/Estuarine Complex in south Louisiana. DS Wolfe Editeurs, Estuarine viability, Academic Press.
- (49) Coulombe-Simoneau J., Hardy S., Baghadi N., King C., Bonn F., Le Bissonais Y., 2001. RADARSAT based monitoring of soil roughness over an agricultural area affected by excessive runoff. *Remote Sensing in Hydrology 2000, Remote Sensing and Hydrology 2000*, Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 2000, IAHS Publ. N° 267, pp 362-364.
- (50) Creamer N.G., Bennett M.A., Stinner B.R., Cardina J., Regnier E.E., 1996. Mechanisms of weed suppression in cover crop-based production systems, *Hortscience*, Vol.31, p. 410-413.
- (51) Cros-Cayot S., 1996. *Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant*. Contexte Armoricaïn. Thèse de Doctorat de l'ENSAR, 218 p. + annexes.
- (52) Dabney S.M., Delgado J.A., Reeves D.W., 2001. Using winter cover crops to improve soil and water quality, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, Vol. 32 (7&8), pp 1221-1250.

- (53) David T., 1999. *Mise en place d'un SIG sur le bassin versant du Scorff*. Maîtrise de Géographie, Université de Rennes 2, 101 p. + annexes.
- (54) DeGrandi G.F., Mayaux P., Malingreau J.P., Rosenqvist A., Saatchi S., Simard M., 2000, New perspectives on global ecosystems from wide-area radar mosaics flooded forest mapping in the tropics. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp 1093-1114.
- (55) Delahaye D. 2002. *Apport de l'analyse spatiale en Géomorphologie. Modélisation et approche multiscalaire des risques*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rouen, 471 p.
- (56) Dempster A. P., 1968. A generalisation of Bayesian inference. *Journal of the Royal Statistical Society*, pp 205-247.
- (57) Dezert J., 2003. Fondations pour une nouvelle théorie du raisonnement plausible et paradoxal. Application à la fusion d'informations incertaines et conflictuelles, *Rapport Technique*, ONERA, 76 p.
- (58) Dubreuil V., Le Dû L., 1997, Etude du couvert végétal (NDVI) par télédétection (NOAA-AVHRR), Participation à l'ouvrage "*Le climat, l'eau et les hommes; Mélanges offerts au Professeur Jean Mounier*", Presses Universitaires de Rennes, pp 45-63
- (59) Dubreuil V., Lecerf R., Hubert-Moy L., 2004. Analyse de la variabilité climatique interannuelle en région de paysage hétérogène (Bretagne) à partir de synthèses mensuelles NDVI à basse résolution. *XVII colloque de l'Association Internationale de Climatologie (In press)*.
- (60) Eastman R.J., 1997. Idrisi for Windows User's guide, version 2.0, Worcester, Idrisi Project, Clark University.
- (61) Eastman, R. 1999. *Guide to GIS and Image Processing*. Clark University, Worcester, MA.
- (62) Ferber, 1995. Les Systèmes Multi-Agents, Paris, Interéditions, 522 p.
- (63) Ferrand, J.P., 1993. Le patrimoine naturel du bassin du Scorff. Syndicat du bassin du Scorff, 173 p.
- (64) Fisher G., Sun L.X., 2001. Model based analysis of future land use development in China, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85, pp 163-175.
- (65) Fischer T.E., Burrill L., 1993. Managing interference in a sweet corn-white clover living mulch system. *Am. J. of Alt. Ag.*, Vol. 8, pp 51-56.
- (66) Flatrès P., 1986,. *La Bretagne*. Paris, PUF, 183 p.
- (67) Foody G.M., Boyd D.S., 1999. Detection of partial land cover change associated with the migration of inter-class transitional zones. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, n°14, pp 2723–2740.

- (68) Forsyth, T. 1999. Questioning the impacts of shifting cultivation. *Watershed*, Vol. 5, n°1, pp 23-29.
- (69) Fulong W., 2002. Calibration of stochastic cellular automata : the application to rural-urban land conversions, *International Journal Geographical Information Science*, Vol. 16, No8, pp 795-818.
- (70) Fung T., Ledrew E, 1988, The determination of optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices. *American Society for photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, N°10, pp 1449-1454.
- (71) Gallien E., Le Bissonnais Y., Eimberck M., Benkhadra H., Ligneau L., Ouvry J.F., Martin P. 1995. Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Cahiers Agriculture*, Vol. 4, pp. 171-183.
- (72) Geist H.J. Lambin E.F., 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. - *BioScience*. Vol. 52, n°2, pp 143-150.
- (73) Gibson C.C., Ostrom E., Anh T.K., 2000. The concept of scale and the Human Dimensions of Global Change: a survey, *Ecological Economics* 32, pp 217-239.
- (74) Gilbert N., Troitzsch K. G., 1999. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, London, UK.
- (75) Goovaerts P., 2002. Geostatistical modelling of spatial uncertainty using p-field simulation with conditional probability fields, *International Journal Geographical Information Science*, vol. 16, No 2, pp 167-178.
- (76) Gordon J., Shortliffe E., 1984. The Dempster-Shafer theory of evidence: Rule based expert systems. *The MYCIN Experience of the Stanford Heuristic Programming Project* Buchanan B. et Shortliffe E. eds., Addison Wesley, Reading, MA, pp 272-292.
- (77) Griffin J.L., Dabney S.M., 1990. Preplant–postemergence herbicides for legume cover-crop contrôle in minimum tillage systems. *Weed Tech.*, Vol. 4, pp 332-336.
- (78) Haith D.A., 1976. Land Use and Water Quality in New York Rivers. *J. of Env. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 102, pp 1-15.
- (79) Haton J.P., Nadjat B., Charpillat F., Haton M.C., Lâasri B., Lâasri H., Marquis P., Mondot T., Napoli A., 1991, *Le raisonnement en intelligence artificielle*, InterEdition, 467 p.
- (80) Heuvelink Gerard B.M., Burrough P.A., 2002. Guest Editorial, Developments in statistical approaches to spatial uncertainty and its propagation, *International Journal Geographical Information Science*, Vol. 16, No2, pp 111-113.
- (81) Hubert-Moy L. *et al.*, 2002. Site web du GSTB, <http://www.uhb.fr/gstb>

- (82) Hubert-Moy L., Cotonnec A., Le Du L., Chardin A., Perez P., 2001. A comparison of classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units. *Remote Sensing of Environment*, ed. Elsevier, Vol. 75, N°2, pp 174-187.
- (83) Hubert-Moy L., 1998. *Analyse de la structure spatiale de l'occupation des sols par télédétection*. In « Agriculture Intensive et Qualité des Eaux » (dir. C. Cheverry), ed. INRA, pp 41-52.
- (84) Hubert-Moy L., Clément B., Lennon M., Houet T., Lefevre E., 2003. Etude de zones humides de fonds de vallées à partir d'images hyperspectrales CASI : Application à un bassin versant de la région de Pleine-Fougères (Bretagne, France). *Photo-Interprétation*, Hubert-Moy L. ed., N°2003/01, pp 41-48.
- (85) Hubert-Moy L., Corgne S., Mercier G., Solaiman B., 2002. Land use and land cover change prediction with the theory of evidence: a study case in an intensive agricultural region in France. Proceedings. *Fusion 2002 Conference*, Washington D.C., 8-11 July, pp 114-121
- (86) Hubert-Moy L., Gascuel-Oudou C., 2001. Les indices parcellaires de risque de transfert des polluants vers les eaux superficielles : de leur base conceptuelle à leur usage pour une approche intégrée à l'échelle du bassin versant. *Colloque « Hydrosystèmes, Paysages et Territoires*, Lille, 6-8 septembre 2001, USTL ed, pp. 21-32. <http://univ-lille1.fr/geographie/labo/gma.htm>
- (87) Hubert-Moy L., Quêté Y., Billot M., and Corgne S., 2001. Trajectories of Land-cover-change in intensive agricultural regions : a short-time predictive approach with the Dempster-Shafer theory. *Proceedings of the First International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, World Scientific Co. Pte. Ltd, vol.2, pp 403-414.
- (88) Huete A. R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, Vol. 25, pp 295-309.
- (89) IFREMER, 1999. Pollutions diffuses du bassin versant au littoral, Ed. Merceron M, 350 p.
- (90) Inagaki T. 1991. Interdependence between safety-control policy and multiple-sensor schemes via Dempster-Shafer Theory. *IEEE Trans. on reliability*, Vol 40, no 2, June 1991 pp182-188
- (91) Jackson R. D., Huete A. R., 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, Vol. 11, pp 185-200.
- (92) Johnson R.D., Kasischke E.S., 1998. Automatic detection and classification of land cover characteristics using change vector analysis, *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 19, N°3, pp 411-426.

- (93) Kergomard C., 2000. Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. *Cybergeo*, No. 181.
<http://www.cybergeo.presse.fr/teldschu/kergomar/kergomar.htm>
- (94) Kullback (S.), 1959, - «*Information theory and statistics*», John Wiley and Sons, New York, 395 p.
- (95) Kuo S., Sainju U.M., Jellum E.J., 1997. Winter cover crops effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 61, pp 145-152.
- (96) Lal R., Follett R.F., Cole C.V., 1998. *The potential of US cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*, Ann Arbor Press, Chelsea, MI.
- (97) Lambin E. F., Strahler A. H., 1994. Change-vector analysis in multitemporal space: A tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal-resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 48, n°2, pp 231-244.
- (98) Lambin E.F., 1996. Change detection at multiple temporal scales: Seasonal and annual variations in landscape variables, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.62, N° 8, pp931-938.
- (99) Lambin E.F., 2000. *SYNTHESIS OF SESSION II. Science contributions to European policies*. Electronic conference on LUCC in Europe, LUCC Report series, Series 2, <http://www.geo.ucl.ac.be/LUCC/publications/reportseries/series2/synthesis2.html>
- (100) Launay M., Hubert-Moy L., 1997. Approche spatiale du risque de pollution diffuse en milieu agricole intensif: Application à un affluent de l'Elorn (Bretagne Ouest). Deuxièmes rencontres de THEO QUANT, Besançon 4 et 5 oct. 95, *Annales littéraires de l'Université de Franche-Comté*, pp 57-64.
- (101) Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J., 1998. L'érosion hydrique des sols en France, Rapport INRA/IFEN, 105 p.
- (102) http://erosion.orleans.inra.fr/rapport2002/Download/erosion_hydrique_2002_br.pdf
- (103) Le Clech B., 1998. Environnement et agriculture. Synthèse agricole. 344 p.
- (104) Lee, T., Richards, J.A., and Swain, P.H., 1987, Probabilistic and Evidential Approaches for Multisource Data Analysis, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-25, N°3, pp 283-293.
- (105) Le Hégarat S., Seltz R., Hubert-Moy L., Corgne S., Stach N., 2004. Comparison of performance of change detection by evidential fusion in four application cases. *International Journal of remote sensing (Article soumis)*.
- (106) Le Hégarat-Masclé S., and Seltz R., 2004. Automatic change detection by evidential fusion of change indices. *Remote Sensing of Environment*, Vol.91, n° 3-4, pp 390-404.
- (107) Leduc F., Solaiman B., Cavayas F., 2001. Combination of fuzzy sets and Dempster-Shafer theories in forest map updating using multispectral data, Sensor Fusion. *SPIE*, Vol. 4385, Orlando, USA, 18-20 April 2001, pp 323-334.

- (108) Leynaud G. 1992. Cohérence générale de la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant. *CR. Acad. Agric. Fr.*, Vol. 78, N°6, pp 79-90.
- (109) Li H., Reynolds J. F., 1997. Modeling effects of spatial pattern, drought, and grazing on rates of rangeland degradation: A combined Markov and cellular automaton approach. in *Scale in Remote Sensing and GIS*, D. A. Quattrochi and M. F. Goodchild eds., Lewis Publishers, New York, pp 211-230.
- (110) Ludeke A. K., Maggio R. C., Reid L. M., 1990. An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression and GIS. *Journal of Environmental Management*, Vol. 31, pp 247-259.
- (111) Luna J. 1998. *Multiple Impacts of Cover Crops in Farming Systems*. Integrated Farming Systems, Oregon State University, Corvallis, OR., 10 p.
- (112) Macleod R.B., Congalton R.G., 1998. A quantitative comparison of changedetection algorithms for monitoring eelgrass from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 64, pp 207-216.
- (113) Malila W.A., 1980. Change Vector Analysis: An Approach for Detecting Forest Changes with Landsat. *Proceedings of the 6th Annual Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, pp 326-335.
- (114) Maltby E., Hogan D.V., Mc Innes R.J., 1996. *Functional analysis of European wetland ecosystem*, Phase I FAEWE. Ecosystem Research Report No 18, EUR 16132EN, Luxembourg, p. 48.
- (115) Manson S.M., 2000. Agent based dynamic spatial-simulation of land use/cover change in the Yucatan peninsula, Mexico. Paper presented to the fourth International Conference on Integrated GIS and Environmental Modelling (GIS/EM4), Banff, Canada.
- (116) Martin P., 1997. *Pratiques culturelles, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du nord ouest de l'europe*. Thèse Université Paris-Grignon, 184 p. + annexes.
- (117) Mas, J.F., 1999. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, N°1, pp 139-152.
- (118) Mather J.R., Sdasyuk G.V., 1991, *Global Change: Geographical Approaches*, University of Arizona Press, 289 p.
- (119) Meisinger J. J., Hargrove W. L., Mikkelsen R. L., Williams J. R., Benson V. W., 1991. Effect of cover crops on groundwater quality. In *Cover crops for clean water*, Soil and Water Conservation Society, Hargrove, W. L. (ed.), Ankeny, IA., pp 57-68.
- (120) Meisinger, J.J., Shipley P.R., Decker A.M., 1990. Using winter cover crops to recycle nitrogen and reducing leaching. In *Conservation Tillage for Agriculture in the 1990's*, N. Carolina State Univ., J. P. Mueller and M. G. Waggoner (eds), Raleigh, Spec. Bull. 90-1, pp 3-6.

- (121) Mérot P., Jigorel A. (eds), 1996. Hydrologie dans les pays celtiques. *Actes du 1er colloque interceltique d'hydrologie et de gestion des eaux*, Rennes (France), 8-11 juillet 1996, Rennes : Institut National de la Recherche Agronomique, 470 p.
- (122) Mérot P., 1999. The influence of hedgerow systems on the hydrology of rural catchments in a Temperate Climate. *Agronomie*, Vol. 19, pp 655-669.
- (123) Mérot P., Squividan H., Aurousseau P., Hefting M., Burt T., Maitre V., Kruk M., Butturini A.; Thenail C., Viaud V., 2003. Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecological Modelling*, Vol. 163, pp 51-71.
- (124) Mertens B., Lambin E. F., 1997. Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon. *Applied Geography*, Vol. 17, N°2, pp 143-162.
- (125) Mertikas P., Zervakis M.E., 2001. Exemplifying the theory of evidence in remote sensing image classification, *International Journal Of Remote Sensing*, vol. 22, n°6, pp1081 –1095.
- (126) Meybeck M. *et al.*, 1998. La Seine et son bassin versant, Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé, Ed. Elsevier, 749 p.
- (127) Moreno-Peralto R., 2001. *Utilisation de la télédétection pour la cartographie de cultures légumières : application au bassin versant du Scorff*. Mémoire de DEA, ENSAR, 55 p.
- (128) Moss A.J., 1989, Impact droplets and the protection of soils by plants cover. *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 27, pp 1-16.
- (129) Moyer J.R., Blackshaw E.G., Smith S.M., McGinn S.M., 2000. Cereal cover crops for weed suppression in a summer fallow-wheat cropping sequence. *Can. J. Plant Sci.*, Vol. 80, pp 441-449.
- (130) Muchoney D.M., Haack B.N., 1994. Change detection for monitoring forest defoliation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 60, N°10, pp 1243–1251.
- (131) Muller J. C., Denys D., Morlet G., Mariotti A., 1987. Influence of catch crops on mineral nitrogen leaching and its subsequent plant use. In *Nitrogen efficiency in agricultural soils*, Vol. 2., D. S. Jenkinson and K. A. Smith. (eds), Elsevier, New York.
- (132) O'Callaghan J.R., 1996. *Land Use - the interaction of economics, ecology and hydrology*. Chapman & Hall, London, 200 p.
- (133) Ojima D., Moran E. *et al.*, 2004. Global Land Project Draft Science Plan, 93 p.
- (134) <http://www.glp.colostate.edu/scienceplan.pdf>
- (135) Parker D.C., Manson S. M., Janssen M. A., Hoffmann M. J., Deadman P., 2003. Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 93, N°2, pp 316-340.

- (136) Parra G.A., 1997, *Modélisation dynamique à l'aide d'images satellitaires et de système d'information géographique : application aux Llanos orientales de la Colombie*, Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 224 p.
- (137) Peddle D. R., 1993. An Empirical Comparaison of Evidential reasoning, Linear Discriminant Analysis and Maximum Likelihood Algorithms for Alpine Land Cover Classification. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, pp 31-44.
- (138) Pontius R.G. and Schneider L., 2001, Land-use change model validation by a ROC method, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85, (1-3), pp 239-248.
- (139) Price J. C., 1987. Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices. *Remote Sens. Environ. Vol.* 21, pp 15-27.
- (140) Putnam A.R., 1990. Vegetable weed control with minimal herbicide inputs, *HortScience*, 25(2), pp155-159.
- (141) Raffy M., 1994. Heterogeneity and change of scale in models of remote sensing. Spatialization of multispectral models. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, pp 2359-2380.
- (142) Reeves D.W., 1994. Cover crops and rotations, in J.L. Hatfield and B.A. Stewart (eds), *Crop residue management, Advances in soil science*. Lewis Publishers, Boca Raton, F.L., pp 125-172.
- (143) Reeves D.W., 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.*, 43: 131-167.
- (144) Reicosky D.C., Forcella F., 1998. Cover crops and soil quality interactions in agroecosystems. *J. Soil and Water Conservation*, Vol. 53, N°3, pp 224-229.
- (145) Richardson A. J., Wiegand C. L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, Vol. 43, pp 1541-1552.
- (146) Ridd M.K., Liu J., 1998. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 63, pp 95–100.
- (147) Rothrock C.S., Kendig S.R., 1991. Suppression of black root rot on cotton by winter legume cover crops. In *Cover crops for clean water*, W. L. Hargrove (ed.), Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, pp 155-156.
- (148) Roux L., 1997. *Fusion d'informations multisources pour la classification d'images satellite*. Thèse de l'Université de Paul Sabatier de Toulouse (Sciences), 160 p.
- (149) Roy R.S., Ranganath B.K., Diwakar P.G., Vohra T.P.S., Bhan S.K., Singh, J.J., Pandian V.C., 1991. Tropical forest mapping and monitoring using remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 12, N°11, pp 2205-2225.

- (150) Saaty, 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 5, pp 234-281
- (151) Sellers P.J., Dickinson R.E., Randall D.A., Betts A.K., Hall F.J., Mooney H.A., Nobre C.A., SATO N., Fiels C.B., Henderson-Sellers A., 1997, Modeling the exchanges of energy, water and carbon between continents and the atmosphere, *Science*, 275, pp 502-509.
- (152) Serneels S. et Lambin E.F., 2001. Proximate causes of land-use change in Narok District Kenya : a spatial statistical model, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85, pp 65-81.
- (153) Shafer G., 1976. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press.
- (154) Shannon C.E., Weaver W., 1963. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- (155) Sheridan J.M., 2002. Peak flow estimates for Coastal Plain Watersheds. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, Vol.45, N°5, pp1319-1326.
- (156) Shipley P.R., Meisinger J.J., Decker A.M., 1992. Conserving residual corn fertilizer nitrogen with winter cover crops. *Agron. J.*, Vol. 84, pp 869-876.
- (157) Singh A., 1989. Review article: Digital change detection techniques using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, N° 6, pp 989-1003.
- (158) Sklar F. H., Costanza R., 1991. The development of dynamic spatial models for landscape ecology: A review and prognosis. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*, M. G. Tuner and R. H. Gardner eds., Springer-Verlag, New York, pp 239-288.
- (159) Smarandache F., Dezert J., 2004. Advances and Applications of DSmt for Information Fusion. Collected works, American Research Press, Rehoboth, 418 p.
- (160) Smeda R.J., Putnam A.R., 1988. Cover crop suppression of weeds and influence on strawberry yields. *HortScience*, Vol. 23, pp 132-134.
- (161) Smets P., 1990 b. Constructing the pignistic probability function in a context of uncertainty. in *Uncertainty in Artificial Intelligence 5*, Henrion M., Shachter R. D., Kanal L. N., Lemmer J.F. Eds., North Holland, Amsterdam, pp 29-40.
- (162) Smith A.J., Wright R.K., Jantz C., Tringe J., 2003. Application of multitemporal Landsat data to map and monitor land cover and land use change in the Chesapeake Bay watershed", *Multitemp03*, Ispra, Italy, (*in press*).
- (163) Smith M. O., Ustin S. L., Adams J. B., Gillespie A. R. , 1990. Vegetation in deserts: A regional measurement of abundance from multi-spectral images. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 31, pp. 1-26
- (164) Srinivasan A., Richards J.A., 1990. Knowledge-based techniques for multi-source classification, *International Journal Of Remote Sensing*, Vol. 11, N°3, pp 505-525.

- (165) Steffen W., Sanderson A., Tyson P.D., Jäge, J., Matson P.A., Moore III B., Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber H.-J., Turner II B.L., Wasson R.J., 2004. *Global Change and the Earth System: A Planet under Pressure*, *Global Change*, the IGBP Series, Berlin, GR, Springer-Verlag, Vol. XII, 336 p.
- (166) Sudano J. 2002. Inverse pignistic Probability Transforms. *Proceedings of the 5th International Conference of Information Fusion, (Fusion 2002)*, Annapolis, MD, USA, pp 1277-2183.
- (167) Syndicat du bassin du Scorff, 2004. Document d'objectifs pour le site Natura 2000, Rivières du Scorff et de la Sarre, Forêt de Pont-Calleck, site FR 5300026, 197 p.
- (168) Syndicat du bassin du Scorff, 1994. Etude de la qualité des eaux du bassin versant du Scorff, DIREN Bretagne, 38 p.
- (169) Syndicat du bassin du Scorff, 1996. Etude de définition de programme d'actions renforcées Bretagne Eau Pure n°2, Phase n°1, Diagnostic-objectifs du programme, SCE.
- (170) Syndicat du bassin du Scorff, 1998. Bassin versant du Scorff, programme d'actions renforcées bretagne eau pure N°2, SCE.
- (171) Syndicat du bassin du Scorff, 2004. Suivi de l'occupation du sol, des sols nus hivernaux et analyse de leur évolution, Rapport SOGREAH, 33 p.
- (172) Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J.J., Perbos J., Deschamps P.Y., 1990. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code. *Int. J. of Remote Sensing*, Vol. 11, N°4, pp 659-668.
- (173) Taraba J. L., Dinger J. S., Sendlein L. V. A., Felton G. K., 1996. Land-use impacts on water quality from small karst agricultural watersheds in Kentucky. *American Society of Agricultural Engineers International Meeting*, Phoenix, Arizona, paper N°962086, 30 p.
- (174) Thenail C., Baudry J., Le Coeur D., 2004. La gestion technique du territoire par les exploitations agricoles : évaluer la diversité des contraintes et modes d'organisation. In « *Savoirs et savoirs-faires sur les bassins versants, Pollution de l'eau et dynamique de restauration de sa qualité* », 20, 21 et 22 avril 2004, Vannes, J.R. Lucas et L. Ligneau Eds., pp 141-142.
- (175) Tobler W. R., 1979. Cellular geography. In *Philosophy in Geography*, S. Gale and G. Olsson, eds., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Netherlands, pp 379-386.
- (176) Tucker C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ*, Vol. 8, pp 127-150.
- (177) Turner II B.L., Skole D., Sanderson S., Fischer G., Fresco L., Leemans R. 1995. *LUCC Science Research Plan*. IGBP Report n. 35 & HDP Report n. 7, Stockholm and Geneva. <http://www.icc.es/lucc/science/scienceplan.html>

- (178) Ustin S. L., Smith M. O., Adams J. B., 1993. Remote Sens of Ecological Processes: A strategy for developing and testing ecological models using spectral mixture analysis. In *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*, edited by J. Ehrlinger and C. Field. New York: Acad Press.
- (179) Veldkamp A., Fresco L. O., 1996. CLUE: A conceptual model to study the conversion of land use and its effects. *Ecological Modelling*, Vol. 85, N° 2/3, pp. 253-270.
- (180) Veldkamp A., Lambin E. F., 2001. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, Vol. 85, N°1-3, pp. 1-6.
- (181) Vega García, C., Woodard P.M., Titus S.J., Adamowicz W.L., Lee B.S., 1995. *A logit model for predicting the daily occurrence of human-caused forest fires*. International Journal of Wildland Fire, 5(2), pp 101-111.
- (182) Verburg P.H., Schot T., Dijst M., Veldkamp A., Forthcoming. 2004, Land Use Change Modeling : Current Practise and Research Priorities. *GeoJournal*, In press.
- (183) Viaud V., 2004. *Organisation spatiale des paysages bocagers et flux d'eau et de nutriments. Approche empirique et modélisations*. Thèse Unité INRA Rennes SAD Armorique.
- (184) Wooldridge M., 1999. Intelligent Agents. In *Multiagent Systems: a Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, Weiss G. ed., MIT Press, Cambridge, MA, pp 27-77.
- (185) Yager R., 1983. Entropy and Specificity in a Mathematical Theory of Evidence. *Int. J. General Systems*, Vol. 9, pp 249-260.
- (186) Yager R., 1986. A general approach to decision making with evidential knowledge. In *Uncertainty in Artificial Intelligence*, Kanal L. et Lemmer J. Eds., Elsevier Science Publishers B.V., pp 317-327.
- (187) Zadeh L. A., 1965. Fuzzy set. *Information and Control*, Vol. 8, pp 338-352.
- (188) Zhang Q., Wang J., Peng X., Gong P., Shi P., 2002. Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multi-temporal Landsat TM data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, N°15, pp 3057-3078.

Résumé

La couverture hivernale des sols a un impact avéré sur la qualité de l'eau, en influant sur le transfert des flux de polluants d'origine agricole au sein de bassins versants. Sa prédiction, si elle peut constituer une aide à la programmation d'actions dans le cadre de programmes de restauration de la qualité de l'eau, pose cependant un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique. L'objectif de ce travail est de développer une méthode reproductible qui permette d'effectuer une prédiction à court terme de la couverture hivernale des sols. Une approche approximative reposant sur un modèle expert utilisant la règle des évidences de Dempster-Shafer a été retenue, car elle permet de prendre en compte l'imprécision et les lacunes de connaissances liées à cette problématique et aux données disponibles, et d'associer un degré de confiance aux résultats produits. Des prédictions de la couverture hivernale des sols sont d'abord effectuées sur un site expérimental localisé en Bretagne selon les deux hypothèses « Sols couverts » et « sols nus à peu couverts ». Après avoir déterminé les dynamiques spatio-temporelles des changements passés, notamment à partir d'une série multitemporelle d'images de télédétection, et avoir défini les facteurs motivant les changements passés et à venir, la fusion des sources d'informations qui représentent ces facteurs est réalisée avec la règle de Dempster-Shafer. Les résultats sont mitigés : Les prédictions sont cohérentes à l'échelle du bassin versant mais l'affectation spatiale des prédictions à l'échelle parcellaire, qui est bonne pour la classe « Sols couverts » reste problématique pour la classe « Sols nus à peu couverts » en raison du niveau de conflit élevé entre les sources d'information pour cette hypothèse. L'utilisation de la théorie récente de Dezert-Smarandache, qui autorise la prise en compte d'informations paradoxales, permet d'améliorer les scores de prédictions pour la classe « Sols nus à peu couverts ». Une évaluation de la reproductibilité de l'approche prédictive développée est alors effectuée à travers l'application du modèle sur un bassin versant plus étendu et où les données sont moins nombreuses. Si la classe « Sols couverts » reste bien évaluée avec les deux règles de fusion, l'affectation spatiale de la classe « Sols nus à peu couverts » est en revanche toujours affectée d'un faible taux de prédiction correcte, illustrant la nécessité de l'intégration de nouvelles sources d'information dans le modèle pour cette hypothèse aux fortes variabilités spatiotemporelles.

Mots-clés : Environnement, Modélisation approximative, Télédétection, Analyse Spatiale, Bassin versant, Incertitude, Fusion de données, Théorie de Dempster-Shafer, Théorie de Dezert-Smarandache.

Abstract

In intensive agricultural regions, winter vegetation covering is a key indicator of water transfer processes. Its prediction can help local decision making for restoring water quality. Though, spatial prediction modelling of winter land cover is complex and thus it appears necessary to introduce uncertainty in the modelling process, especially as high spatial and temporal variability are encountered. The objective of this work is to develop a reproducible method to predict the land cover distribution for the following winter season for the two hypotheses "Bare soils" and "Covered soils". The selected modelling approach is based on an expert model using the Dempster-Shafer rule, because it considers both uncertainty and imprecision both in the modelling process and in the results, as confidence levels are associated with the predictions. The model has been applied on an experimental watershed located in Brittany. After having assessed the spatial and temporal dynamics of winter coverage from a multitemporal series of remote sensing images, and identified the driving factors of these changes, sources of information representing these factors are fused with the Dempster's rule. Results are ambivalent according to the studied hypothesis. The prediction scores are good at the watershed scale but present limits for allocating the land class at a field scale, especially for the "Bare soils" class, because the level of conflict between sources of information is high. The Dezert-Smarandache theory, that allows to introduce paradoxical information in the modelling process, is then applied and increases the prediction scores for the "Bare soils" class. The reproductibility of the modeling approach is then evaluated in applying the model on another study site, wider and less documented than the previous one. The "Bare soils" class remains well evaluated with both fusion rules, but the spatial allocation of the land class at a field scale is still not well managed, that indicates the need to integrate new sources of information in the model to better predict the future land allocation.

Key-words: Environment, Remote Sensing, Approximate Modelling, Spatial Analysis, Watershed, Uncertainty, Data Fusion, Dempster-Shafer Theory, Dezert-Smarandache Theory.